

RAPPORT D'ETUDE
N° 71165/P01b

04/11/2005

**Estimation de l'exposition aux fumées de
l'incendie du 27/06/2005 sur le site de
SBM Formulation à Béziers**

Rapport final

Estimation de l'exposition aux fumées de l'incendie du 27/06/2005 sur le site de
SBM Formulation à Béziers

Direction des Risques Accidentels/ Unité Incendie-Ventilation

Client : **SBM - Béziers**

Liste des personnes ayant participé à l'étude : S. PATEJ, L. MOSQUERON, A.
BAULIG, B. HAZEBROUCK

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

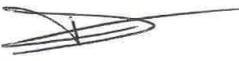
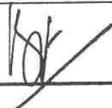
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	S. DUPLANTIER	D. GASTON	B. FAUCHER
Qualité	Responsable Unité INVE Direction des Risques Accidentels	Directeur Adjoint de la Direction des Risques Accidentels	Directeur de la Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION	6
1.1 Contexte de l'étude	6
1.2 Organisation du document	6
2 DÉTERMINATION DU TERME SOURCE	9
2.1 Définition de la cinétique de l'incendie	9
2.2 Composition des fumées.....	9
2.2.1 Regroupement des produits par grandes familles	9
2.2.2 Hypothèses de travail pour le calcul de composition des fumées.....	11
2.2.2.1 Eléments relatifs au devenir des différents atomes lors de l'incendie	11
2.2.2.2 Synthèse	13
2.2.3 Calcul du débit de fumées	14
3 LA DISPERSION DES FUMÉES DANS L'ATMOSPHERE	17
3.1 Hypothèses de calcul	17
3.2 limites du modele	17
3.3 Choix des conditions météorologiques.....	17
3.3.1 Pour la phase de feu développé	19
3.3.2 Pour la phase de décroissance	20
3.3.3 Pour la phase de feu couvant.....	20
3.3.4 Synthèse.....	22
3.3.5 Influence de la direction du vent	22
3.3.5.1 Pour chaque phase	22
3.3.5.2 Sur la largeur du panache	23
3.4 Evolution de la concentration en fumées sur l'axe du panache au niveau du sol pour les différentes phases.....	24
3.5 Comparaison avec les données recueillies lors de l'incendie	29
3.5.1 Air LR.....	29
3.5.2 Données recueillies par les pompiers.....	29
3.5.3 Autres observations	29
3.5.4 Conclusions sur les modélisations.....	30
4 SEUILS D'EFFET RETENUS.....	31
4.1 Pour les effets irréversibles.....	31

4.2	Pour les effets réversibles de courte durée	32
4.2.1	Types d'effets réversibles de courte durée associés aux substances.....	33
4.2.2	Pour les effets réversibles aigus (population générale)	36
4.2.3	Pour les effets réversibles aigus (populations sensibles).....	37
4.2.4	Pour les effets réversibles sub-aigus (populations sensibles).....	38
4.3	Valeurs Limites d'Exposition Professionnelles	39
5	EXPLOITATION DES RÉSULTATS POUR DÉTERMINER L'IMPACT POTENTIEL SUR LES PERSONNES	41
5.1	Pour les effets létaux et irréversibles.....	41
5.2	Effets réversibles aigus (population générale).....	41
5.3	Effets réversibles aigus (populations sensibles).....	41
5.4	Effets réversibles sub-aigus	42
5.5	Comparaison aux Valeurs Limites d'Exposition Professionnelles	42
5.6	Synthèse des résultats	42
6	RÉFÉRENCES CITÉES.....	45
7	SYNTHÈSE.....	47
8	LISTE DES ANNEXES	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Répartition de la direction du vent pour les différentes sous phases de du feu couvant.....	21
Figure 2	: Représentation schématique des différentes grandeurs	24
Figure 3	: Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 1 de feu développé.....	25
Figure 4	: Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 2a de feu décroissant pour des conditions météorologiques stables	26
Figure 5	: Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 2b de feu décroissant pour des conditions météorologiques instables.....	26
Figure 6	: Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 3a du feu couvant.....	27
Figure 7	: Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 3b du feu couvant.....	27
Figure 8	: Distribution gaussienne des concentrations au sein d'un panache	4

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Grandes familles de produits retenues par l'INERIS.	10
Tableau 2 : Répartition en éléments simples du stockage retenu pas l'INERIS....	10
Tableau 3 : Hypothèses sur le devenir des éléments et des sources potentielles de nuisance.....	13
Tableau 4 : Fraction massique de polluants dans les fumées	14
Tableau 5 : Synthèse des différentes caractéristiques de l'émission	15
Tableau 6 : Vitesse et secteur du vent sur la période étudiée.....	18
Tableau 7 : Vitesse et direction du vent durant la phase de feu développé	19
Tableau 8 : Vitesse et direction du vent durant la phase de décroissance.....	20
Tableau 9 : Conditions météorologiques retenues pour les modélisations.....	22
Tableau 10 : Demi largeur du panache pour plusieurs conditions de stabilité.....	24
Tableau 11 : Concentrations maximales de fumées modélisées au niveau du sol	28
Tableau 12 : Concentrations maximales calculées pour les différentes phases (mg/m ³)	28
Tableau 13 : Concentrations maximales relevées par la mini remorque de AIR LR	29
Tableau 14 : Types d'effets considérés.....	31
Tableau 15 : Seuils d'effet létaux des différents produits isolés et du mélange	32
Tableau 16 : Seuils d'effet irréversibles des différents produits isolés et du mélange	32
Tableau 17 : Types d'effets réversibles de courte durée associés aux substances	35
Tableau 18 : Seuils de toxicité considérés pour les effets réversibles aigus (population générale)	37
Tableau 19 : Valeurs Toxicologiques de Référence pour les effets réversibles aigus (populations sensibles).....	38
Tableau 20 : Valeurs Toxicologiques de Référence pour les effets réversibles sub-aigus	38
Tableau 21 : Valeurs limites d'exposition professionnelles.....	39
Tableau 22 : Synthèse des différentes distances d'effet calculées, par substances	43
Tableau 23 : Synthèse des différentes distances d'effet calculées, par types d'effets.....	44

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Suite à l'incendie du 27/06/05, la Société SBM Formulation établie à Béziers a reçu le 07 juillet 2005 un arrêté préfectoral d'urgence No. 2005-1-1517 daté du 29/06/2005, établissant des prescriptions pour des travaux d'urgence.

La Société SBM Formulation doit faire procéder par un organisme compétent à une évaluation de l'impact sanitaire, sur les populations avoisinantes des fumées émises lors de l'incendie.

Afin de répondre conjointement aux préoccupations des autorités et à la demande de l'exploitant, l'INERIS a proposé de réaliser cette étude en trois volets :

- dans un premier temps, l'INERIS procèdera à la collecte conservatoire d'échantillons de sols, de végétaux, de frottis de surface et d'eau de ruissellement d'incendie ; Cette campagne s'est déroulée entre le mardi 19 et le vendredi 22 juillet 2005 sur et autour du site de SBM Formulation, selon un plan d'échantillonnage permettant de prendre en compte les conditions météorologiques ayant prévalu au cours de l'incendie et des journées suivantes.
- dans un deuxième temps, l'INERIS procèdera à l'analyse et la modélisation de l'accident de manière à définir un plan d'analyse des échantillons permettant de collecter l'information la plus pertinente pour la suite de l'étude ;
- dans un troisième temps, l'INERIS procèdera à l'évaluation des impacts, voire des risques pour la santé des populations avoisinantes.

Le présent document de travail traite de la modélisation de l'accident afin de fournir des éléments pour estimer l'impact sur la santé des populations avoisinantes

1.2 ORGANISATION DU DOCUMENT

Au préalable, il est utile de rappeler que pour évaluer les distances sous le vent d'un incendie en deçà desquelles des effets sur la santé humaine, liés à la toxicité des fumées, pourraient être ressentis, une démarche en quatre étapes peut être appliquée :

- (1) caractérisation de la source d'émission des polluants toxiques, c'est-à-dire, entre autres, hauteur, vitesse et température d'émission des fumées rejetées à l'atmosphère ;
- (2) calcul de la dispersion atmosphérique et notamment des niveaux maximum de concentration en gaz toxiques au niveau du sol ;
- (3) caractérisation de la toxicité des fumées d'incendie au moyen de seuils critiques correspondant à l'apparition d'un effet donné sur la santé humaine ;
- (4) comparaison des niveaux maximum calculés avec les seuils de toxicité déterminés à l'étape précédente.

De fait, le document comporte les différentes parties suivantes :

- Définition du terme source : composition et débit pour les différentes phases de l'incendie,
- Evaluation des concentrations au niveau du sol sur l'axe du panache (c'est-à-dire sous le vent),
- Définition de la toxicité des fumées pour différentes durées d'exposition ou pour les différents effets susceptibles d'être observés lors de l'exposition aux produits présents dans les fumées,
- Comparaison des concentrations avec les seuils retenus.

2 DETERMINATION DU TERME SOURCE

Pour établir le terme source (cinétique de l'incendie, composition des fumées, débit de fumées), l'INERIS s'est basé sur les documents transmis par SBM et notamment :

- La liste des produits présents dans le stockage avant l'incendie,
- Les relevés des pompiers au cours de l'incendie,
- Les mesures effectuées par Air Languedoc Roussillon à l'aide d'une mini remorque placée à 150 m de l'incendie,
- La cinétique de l'incendie.

2.1 DEFINITION DE LA CINETIQUE DE L'INCENDIE

Concernant le dernier point, en se basant sur les informations transmises par les pompiers et l'exploitant, le scénario retenu est le suivant :

- Phase d'incendie développé de 3h30 à 7h du matin, heure à laquelle le feu est considéré comme circonscrit et où débute la phase de décroissance,
- Phase de décroissance de l'incendie jusqu'à 12h, heure de l'extinction,
- La dernière phase concerne un feu couvant qui a duré plusieurs jours.

2.2 COMPOSITION DES FUMÉES

Concernant la composition des fumées, elle a été établie selon la démarche suivante :

- Un premier tri des produits présents a été effectué à partir des informations transmises par SBM formulation ;
- Par la suite, pour chaque catégorie, des produits représentatifs (soit par leur quantité, soit par leur propension à former des substances toxiques lors de leur combustion) ont été retenus ;
- A partir des formules chimiques de ces produits, une décomposition du stock en éléments simples a été effectuée ;
- Ces éléments ont été ensuite recombinaés selon des règles couramment utilisées dans le cadre d'études relatives à la dispersion de fumées toxiques. Ces règles, rappelées dans ce rapport, sont issues du référentiel INERIS sur la dispersion de fumées d'incendie disponible sur le site internet INERIS (www.ineris.fr).

2.2.1 REGROUPEMENT DES PRODUITS PAR GRANDES FAMILLES

L'INERIS a repris le classement effectué par SBM formulation en grandes familles et a ensuite classé les produits selon leur degré d'implication dans l'incendie :

- participation active : combustible,
- participation passive : produits incombustibles mais se décomposant sous l'effet de la chaleur
- absence de participation : inerte.

Pour mémoire, le stockage de SBM formulation comporte environ 1 000 références. Il n'est donc pas possible techniquement de toutes les prendre en compte.

Les produits initialement présents et les produits finalement retenus par l'INERIS sont regroupés dans le Tableau 1.

Désignation	Valeur fournie (kg)	Valeur retenue (kg)
Bois	37 500	37500
Polyéthylène (PE)	42 600	42600
Non combustible	189 771	Non Pris en Compte
Colorant	6 316	Non Pris en Compte
Divers	17 091	Non Pris en Compte
Matière active	194 789	194789
Produit fini	1 000 975	1133190
Vrac	132 615	
Rinçage	11 758	Non Pris en Compte
Solvant	19 846	19846
Tensioactif	75 934	Non Pris en Compte
Total	1 729 195	1 428 325

Tableau 1 : Grandes familles de produits retenues par l'INERIS.

Le critère de choix pour les produits non retenus repose d'une part sur la faible quantité de produit impliquée (colorant, divers, rinçage), soit sur le peu d'informations disponibles sur les produits (rinçage, tensioactif).

Concernant les produits retenus, deux cas se présentent :

- D'une part, les familles qui ont une composition homogène comme :
 - les solvants qui ont été assimilés à du xylène (solvant se caractérisant par une forte vitesse de combustion) ;
 - le bois qui a été assimilé à de la cellulose ;
 - et le polyéthylène (PE) a été considéré comme pur.
 - D'autre part, les familles de produits qui ont une composition très hétérogène comme les produits finis, le vrac et les matières actives. Pour ces familles, il a été nécessaire de réaliser une sélection des produits et plus particulièrement des matières actives présentes dans les produits finis. Cette sélection a été effectuée en prenant en priorité les produits en plus grande quantité.
- . Chacun de ces produits a ensuite été décomposé en fraction massique d'éléments atomiques.

Ces éléments ont ensuite été cumulés avec celles du bois, PE et solvants présents dans le stockage pour aboutir à la répartition en éléments simples présentée dans le Tableau 2.

C	O	H	N	Cl	F	S	P	Br	H ₂ O	matières inertes	Total (kg)
556 660	84 709	58 682	25 845	4 4678	4 758	45 918	15 202	666	217 926	373 282	1 428 325
38,97%	5,93%	4,11%	1,81%	3,13%	0,33%	3,21%	1,06%	0,05%	15,26%	26,13%	100,00%

Tableau 2 : Répartition en éléments simples du stockage retenu pas l'INERIS

Par la suite, lors de la combustion, ces éléments vont se recombinaer au sein de nouvelles molécules. Le mode de composition de ces molécules est présenté au paragraphe suivant.

2.2.2 HYPOTHESES DE TRAVAIL POUR LE CALCUL DE COMPOSITION DES FUMÉES

Pour mémoire, les hypothèses de travail sur la chimie du feu reposent sur la connaissance des propriétés physiques et chimiques des matières mises en jeu et sur des données expérimentales dont dispose l'INERIS, notamment les données issues des essais, tels que des essais d'incendie de palettes de produits phytosanitaires en galerie d'incendie (CERCHAR, 1989) ou des essais Tewarson (calorimètre).

Les hypothèses généralement employées sont précisées par la suite, elles sont issues du référentiel « Dispersion de fumées toxiques » (Chivas, 2002).

Il est important de mentionner que, dans le cas de SBM Formulation, tous les produits ne pouvant être testés, le parti a été pris d'utiliser les hypothèses forfaitaires qui sont majorantes dans la mesure où il est supposé que le taux de conversion le plus élevé des atomes susceptibles de conduire à la formation de substances toxiques a toujours été retenu.

2.2.2.1 ELEMENTS RELATIFS AU DEVENIR DES DIFFERENTS ATOMES LORS DE L'INCENDIE

Carbone

Les produits d'oxydation du carbone sont le CO, le CO₂, les suies et l'HCN (en cas de présence d'azote dans la molécule de départ). L'INERIS retient un rapport molaire CO/CO₂ de 0,1 pour la répartition des produits issus de l'oxydation du carbone (Tsuchiya, 2000 et Marlair, 1996). Cette valeur de 0,1 est généralement jugée suffisamment conservatrice, au regard de l'expérience acquise par l'INERIS pour les incendies bien ventilés. Cette valeur peut toutefois être modulée, notamment lorsque le feu est sous ventilé. Ce ratio peut alors prendre des valeurs supérieures.

Chlore

La formation de chlore libre (Cl₂) est possible selon la nature du produit et/ou selon les résultats d'essais de combustion. Dans la plupart des cas, la formation de COCl₂ (chlorure de carbonyle ou phosgène) est négligeable et ne peut a priori se concevoir qu'à l'état de traces pour les organochlorés. Des quantités significatives d'autres molécules chlorées toxiques (Cl₂) plus complexes sont peu plausibles dans un feu généralisé bien développé. En effet, le niveau de température est suffisant pour casser ces molécules et former principalement du HCl. L'état de l'art consiste généralement à retenir l'hypothèse conservatrice suivante : tout le chlore se transforme en HCl, composé le plus stable du point de vue thermodynamique.

On peut noter que HCl peut se dissocier en H₃O⁺ et Cl⁻ en présence d'eau (hydroscopie).

¹ le CERCHAR est l'ancien nom de l'INERIS.

Soufre

Il est communément admis que tout le soufre s'oxyde en SO_2 . Cette hypothèse constitue une approximation réaliste, qui est assez bien validée par la littérature. A cet égard, des essais réalisés par l'INERIS ont notamment mis en évidence la formation de composés tels que des mercaptans, en sus du SO_2 . L'hypothèse qui consiste à admettre que tout le soufre brûlé se transforme en SO_2 est de toute façon retenue car elle est globalement pénalisante d'un point de vue du risque toxique, la toxicité des autres espèces susceptibles d'être émises en quantités significatives (H_2S , mercaptans) étant moindre.

Par ailleurs, une partie du soufre concerné (mais dont il est impossible a priori d'évaluer l'importance) pourrait être piégée sous forme de résidus plus ou moins minéralisés. Le fait de considérer un rendement de conversion de 100% en SO_2 est donc une règle relativement pénalisante et reste en l'occurrence l'option la plus prudente.

Dans le cadre de cette étude, le CS_2 a été identifié lors des mesures effectuées par les pompiers, toutefois, le composé retenu est le SO_2 qui s'avère être plus pénalisant que le CS_2 en terme de toxicité.

Azote

La prise en compte de l'azote est assez complexe, car en général, au moins 4 composés ou familles de composés (HCN , NO_x et dans une moindre mesure NH_3 , mais également N_2) interviennent systématiquement dans les décompositions thermiques de matériaux azotés. L'azote se retrouve dans des proportions variables suivant les conditions de pyrolyse/combustion. Il n'y a donc pas de solution unique valable pour l'ensemble des cas pratiques rencontrés. Toutefois, des données expérimentales obtenues par l'INERIS montrent que dans le cas des incendies, une part importante de l'azote chimiquement liée à l'aliment au feu est recombinaison, sauf cas particulier, en azote moléculaire N_2 (au moins 60%) ou se retrouve piégée dans les suies et les éventuels résidus solides.

Il est difficile dès lors de faire ressortir une tendance quantifiable justifiant une loi de répartition spécifique vers tel ou tel toxique azoté majeur. Pour la plupart des produits comportant intrinsèquement cet élément, il est possible d'adopter une mesure conservatrice dictée par l'expérience accumulée à l'INERIS sur les produits chimiques issus de la chimie fine : 40% de l'azote total est retenu comme vecteur de fumées toxiques et est converti arbitrairement pour moitié en HCN et pour moitié en NO_x (comptabilisé en NO_2) ; le reste se recombine en azote moléculaire.

Phosphore

Il s'agit bien d'un élément source potentielle de nuisances, mais dont la prise en compte est rendue difficile en l'absence de données fiables sur les espèces chimiques gazeuses phosphorées susceptibles d'être émises. Rappelons que de nombreux composés organophosphorés sont des produits neurotoxiques puissants.

Soulignons que les évolutions et recombinaisons des composés oxydés de type P_2O_4 , P_2O_5 , parfois considérés dans certaines études sont encore mal connues de nos jours.

Brome

La formation de HBr et/ou de Br_2 est thermodynamiquement possible. Les toxicités de HBr et Br_2 sont comparables à leurs équivalents chlorés.

Métaux

Concernant les éléments métalliques entraînés dans les fumées de l'incendie, ils sont tous susceptibles d'engendrer d'éventuels rejets nuisibles pour la santé des individus et pour l'environnement (air, sol). Toutefois, les connaissances en la matière restent limitées et il n'existe pas de règles pratiques à appliquer pour déterminer le terme source de pollution "théorique".

Poussières et suies

Concernant les poussières et suies, il est à noter qu'elles ne sont pas considérées dans ce document. Elles sont généralement composées de produits carbonés lorsque ce sont des produits de combustion ou de produits combustibles imbrûlés. Dans le cadre de la démarche mise en œuvre dans cette étude, ces produits n'ont pas été considérés car ils présentent un degré toxicité moindre que les produits mentionnés précédemment. De plus, les poussières et les suies sont des éléments qui sont plus lourds que les gaz qui sont considérés et de fait le pic de poussières au niveau du sol sera observé plus près de la source que celui des gaz qui sont moins sensibles à la gravité.

2.2.2.2 SYNTHÈSE

Le *Tableau 3* présente les principales hypothèses sur le devenir des éléments.

Éléments	Hypothèses de base
C	$CO/CO_2 = 0,1$
Halogénés (Cl, F, Br)	100 % Halogéné → H(Halogéné)
S	100 % S → SO_2
N	50 % en ($NO_x + HCN$) et 50% N_2

Tableau 3 : Hypothèses sur le devenir des éléments et des sources potentielles de nuisance

Le reste des fumées est composée de vapeur d'eau, d'azote (pour ce qui concerne les produits de combustion) et d'air entraîné. Pour mémoire, l'air entraîné représente environ 8/9^{ème} du débit total tel que cela est précisé dans le référentiel « dispersion de fumées ».

Au final, **la fraction massique des substances toxiques dans les fumées** est présentée dans le Tableau 4.

Produits	Fraction massique
CO	2.78E-03
CO ₂	4.37E-02
SO ₂	2.18E-03
NO ₂	4.03E-04
HCN	2.36E-04
HCl	1.09E-03
HF	1.19E-04
HBr	1.60E-05

Tableau 4 : Fraction massique de polluants dans les fumées

Au final, même si cette modélisation et cette interprétation considèrent uniquement les principaux gaz émis lors de la combustion (CO₂, SO₂, CO,...) car l'INERIS ne dispose pas d'outils de modélisation du taux d'émission dans l'incendie, des poussières ou de toutes les substances chimiques plus complexes (produits phytosanitaires, emballages plastiques et leurs produits de dégradation), au delà d'un retour d'expérience "à dire d'expert", il est important de préciser que la démarche retenue est une démarche prudente dans la mesure où elle suppose que tous les produits stockés sont censés disparaître pour former des substances plus toxiques que celles initialement présentes.

En effet, les autres produits de dégradation présents en relativement faible quantité dans l'air, ne sont généralement pas considérés comme déterminants pour l'évaluation des risques aigus associés à l'inhalation des fumées. Leur quantification dans l'air inhalé manquera surtout pour l'évaluation de la part des risques chroniques (long terme) associées à cette inhalation.

2.2.3 CALCUL DU DEBIT DE FUMÉES

Le calcul du débit de fumées repose essentiellement sur la vitesse de combustion surfacique. En effet, c'est ce paramètre qui a une influence directe sur la puissance de l'incendie et donc, le débit de fumées ainsi que la trajectoire de l'axe du panache.

Concernant la vitesse de combustion, les valeurs généralement retenues lors d'incendies développés se situent généralement entre 10 g/m²/s et 30 g/m²/s ; cette dernière valeur étant atteinte notamment lorsque la part de produits inflammables est importante, ce qui n'est pas le cas pour ce stockage.

Ces valeurs n'ont pas pu être retenues dans le cadre de cette étude car cela conduisait à la disparition de la totalité du combustible avant la fin observée de l'incendie. De fait, les valeurs de vitesses de combustion ont été adaptées de sorte que la totalité des produits présents soient brûlés selon la cinétique retenue au paragraphe 2.1. Les choix retenus intègrent également le fait que la phase de feu couvant est caractérisée par une vitesse de combustion très faible en regard de celles observées lors des phase d'incendie développé ou de décroissance du

feu. Pour cette dernière phase, il a été particulièrement difficile de déterminer une vitesse de combustion. En effet, les témoignages font état d'une combustion plusieurs jours après l'incendie. Sur cette base, les vitesses de combustion seraient extrêmement faibles car la quantité de produits restante est relativement faible pour une durée aussi grande. En se basant sur les mesures réalisées par Air Languedoc Roussillon à proximité du site, il peut être estimé que la fin de la phase de feu couvant se situe entre 3,5 et 5 jours d'incendie. En effet, à partir de cette date, les concentrations sont nettement plus faibles même lorsque le vent est orienté en direction de la mini-remorque. Dans une approche prudente, c'est la durée la plus courte qui a été considérée car elle se base sur l'hypothèse que les produits restants seront émis sur une durée plus courte. Elle conduit à une vitesse de combustion de 0,05 g/m²/s¹.

Au final pour l'incendie de SBM Formulation, les différentes vitesses de combustion considérées sont les suivantes :

- 8 g/m²/s
- 3 g/m²/s
- 0,05 g/m²/s

Les différentes phases se caractérisent donc par les propriétés regroupées dans le Tableau 5.

Caractéristiques	Phase développée	Phase de décroissance	Feu couvant
Durée	3 heures 30	5 heures	3,5 jours
Vitesse de combustion (g/m ² /s)	8	3	0,05
Quantité brûlée par heure (t/h)	144	54	0.9
Total brûlé dans la phase ² (t)	504	270	76
Puissance (MW)	635	240	4
Hauteur d'émission (m)	28	19	4
Ecart de température (K)	250	250	250
Débit fumées (kg/s)	2052	770	13

Tableau 5 : Synthèse des différentes caractéristiques de l'émission

A partir de ces caractéristiques, la dispersion des fumées a été modélisée afin d'estimer les conséquences au niveau du sol sur l'axe du panache. Les hypothèses retenues sont présentées au chapitre suivant.

¹ Un deuxième calcul a été effectué avec une vitesse de combustion plus faible pour la phase de feu couvant. Elle a été calculée en retenant une durée de 5 jours, soit 0,035 g/m²/s. Les valeurs obtenues étant du même ordre de grandeur tout en étant plus faibles à celles calculées pour une vitesse de combustion de 0,05 g/m²/s, elles ne sont donc pas présentées dans ce document.

² Le total brûlé est inférieur à la masse totale initiale car l'eau et les composés inertes ne sont pas considérés comme prenant part à la combustion.

3 LA DISPERSION DES FUMÉES DANS L'ATMOSPHERE

3.1 HYPOTHESES DE CALCUL

La dispersion a été modélisée à l'aide d'un modèle gaussien, ce modèle est intégré dans l'outil de calcul DISFUM développé par l'INERIS dont une description est donnée en annexe. Il est important de préciser que cet outil est couramment utilisé pour estimer les distances d'effet des scénarios établis dans le cadre d'étude des dangers. C'est un outil qui comporte plusieurs modules et notamment un calcul de terme source et un modèle de dispersion. Dans le cadre de ces études, il s'agit de déterminer les périmètres où des effets irréversibles ou létaux sont observés pour des durées d'exposition inférieures ou égales à 2 heures (30 minutes étant la durée la plus communément retenue). Par ailleurs, il est pris comme hypothèse conservatoire que le vent ne change pas de direction durant cette période. Par conséquent, le calcul réalisé donne l'évolution de la concentration au niveau du sol sur l'axe du panache en fonction de la distance à la source. L'influence des changements de direction de vent sera discutée par ailleurs dans le paragraphe 3.4. Enfin, la concentration est supposée constante sur toute la durée d'exposition étudiée.

Dans le cas du site étudié, la rugosité a été fixée à 1 m, valeur a priori caractéristique d'une rugosité de type « site industriel ».

3.2 LIMITES DU MODELE

Le modèle gaussien prend en compte la présence d'obstacles et les variations du relief sous la forme d'un paramètre global (la rugosité), il n'est, en toute rigueur, pas applicable à moins de 100 m de la source.

Enfin, les valeurs des concentrations en polluants qui pourraient être calculés à plus de 10 kilomètres de la source comporteraient une incertitude importante, car le modèle employé n'a pas été validé au-delà de cette distance. En particulier, à plus de 10 kilomètres de la source, des phénomènes à grande échelle ont une influence sur la dispersion qui n'est pas prise en compte par le modèle gaussien retenu. De ce fait, des résultats ne seront fournis que dans la plage 100 m à 10 km de la source. Toutefois, les résultats des calculs montrent qu'il n'est pas nécessaire de pousser les calculs plus loin.

Les modèles gaussiens sont des modèles qui sont classiquement utilisés pour des dispersions de produits se développant sur quelques kilomètres, ils ont été établis principalement sur la base de corrélations issues de campagnes expérimentales.

3.3 CHOIX DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Pour mémoire, les conditions météorologiques se caractérisent essentiellement en terme de dispersion par une vitesse de vent et par une classe de stabilité (A,B,...,F) qui dépend du gradient thermique de l'atmosphère.

Les données utilisées pour définir les conditions de stabilité sont présentées dans le Tableau 6.

	lundi		mardi		mercredi		jeudi		vendredi		samedi	
heure	Sect. (°)	V (m/s)										
0			0	0	240	3	270	4	308	6,1	303	3,8
1			350	2	290	3	260	3	296	5,4	297	3,2
2	30	2	260	2	0	0	275	2,5	299	4,1	294	2,2
3	20	2	340	1	0	0	286	3,2	303	4,4	305	2,4
4	360	2	0	0	0	0	295	2,9	309	4,9	272	1,6
5	10	2	180	1	260	1	301	2,8	304	5,4	289	2,8
6	10	3	0	0	0	0	303	3,5	309	5,5	253	3,2
7	10	3	0	0	0	0	291	3,3	310	5,4	283	3,1
8	20	4	230	2	260	3	284	3,9	310	7,2	230	5,1
9	0	0	250	1	270	4	290	3	310	7	268	4
10	50	1	130	1	250	4	274	3	296	7		
11	100	2	180	1	240	6	201	2	290	6		
12	70	2	190	3	260	7	217	3	246	5		
13	150	4	140	2	250	5	242	3	293	6		
14	130	5	160	2	250	6	254	3	279	6		
15	130	4	200	4	250	7	276	4	305	6		
16	160	4	200	1	250	7	292	5	271	6		
17	160	4	240	3	290	9	301	5	223	6		
18	150	3	270	2	290	8	305	5	244	6		
19	170	3	240	5	280	9	304	5	314	6		
20	160	3	130	2	290	8	300	4	309	5		
21	40	1	110	3	300	5	308	4	309	5		
22	0	0	40	2	300	4	306	4	318	4		
23	130	1	270	2	300	3	305	5	309	4		

Tableau 6 : Vitesse et secteur du vent sur la période étudiée

Les données en caractère normal sont celles recueillies par MétéoFrance sur le site de Vias, 7 km à l'est du site SBM³. Elles correspondent pour chaque heure à

³ Ce site est considéré plus représentatif de la zone du site SBM que le site MétéoFrance de Corneilhan 13 km à l'ouest-Nord-Ouest du site SBM, utilisé pour la définition des zones des prélèvements conservatoires INERIS (Annexe A du Rapport d'étude INERIS-DRC-05-71165/DESP-R01a). Les données de ce dernier sont globalement cohérentes avec celles du site

une moyenne sur les dix dernières minutes de l'heure écoulée. Celles en caractère italique sont celles recueillies par la mini-remorque de AIR LR. Elles correspondent pour chaque heure à une moyenne sur la totalité de l'heure écoulée. Ces dernières données ont été préférées car elles donnent des informations au plus près de la source d'émission. Ceci étant, les données se raccordent relativement bien.

Ces données ont ensuite été exploitées pour déterminer les classes de stabilité les plus probables sur les différentes phases de l'incendie.

Lorsque les éléments disponibles ne permettent pas de choisir une classe de stabilité unique pour chacune des périodes, le parti a été pris de retenir plusieurs conditions de stabilité pour chacune des phases en fonction des vitesses de vent disponibles.

Pour déterminer les classes de stabilité à retenir, il faut considérer d'une part la vitesse du vent et d'autre part l'ensoleillement et donc l'heure.

De façon simplifiée, la nuit par faible vent (2 m/s), ce sont des conditions plutôt stables de type E et F qui sont à considérer ; la nuit par vent plus fort (4 à 5 m/s), ce sont plutôt des conditions neutres de type C et D qu'il faut considérer.

En revanche, le jour en été, par faible vent, ce sont des conditions instables de type A ou B et par vent plus fort (4 à 5 m/s), ce sont plutôt des conditions de type B ou C voire D.

Le basculement des conditions E, F vers des conditions de type A, B se fait généralement dans la matinée. De fait, il peut être envisagé que la phase développée s'est déroulée en présence de conditions de stabilité de type E ou F et que la phase de décroissance a plutôt débuté en conditions stables et s'est achevé en conditions instables.

3.3.1 POUR LA PHASE DE FEU DEVELOPPE

Pour la phase de feu développé, les données sont extraites dans le Tableau 7.

Phase	Heure	Secteur (°)	Vitesse (m/s)
feu développé	3	20	2
	4	360	2
	5	10	2
	6	10	3
Moyenne		10	2,2

Tableau 7 : Vitesse et direction du vent durant la phase de feu développé

MétéoFrance de Vias, mais n'indiquent pas la même variabilité de la direction des vents entre 8h et 11h (dans la phase de feu décroissant 2b), avec un secteur de vent compris entre 41° et 74°.

Pour cette phase, la vitesse du vent est faible, environ 2 m/s. Les classes de stabilité associées à ces vitesses de vent en fin de nuit sont généralement de type E ou F. L'INERIS a donc retenu ces deux classes pour cette phase qui correspondent à des conditions de type stable : c'est-à-dire élévation du panache jusqu'à l'altitude où il se trouve en équilibre avec l'atmosphère et ensuite dilution à cette altitude. Ces conditions sont plutôt favorables en terme de conséquences sur l'environnement car la dilution se fait à des altitudes élevées et lorsque le panache retombe au niveau du sol, les concentrations sont faibles.

Pour cette phase, le vent est resté essentiellement de secteur 10° avec une variation de plus ou moins 10°.

3.3.2 POUR LA PHASE DE DECROISSANCE

Pour la phase de décroissance, les données sont extraites dans le Tableau 8.

Phase	Heure	Secteur (°)	Vitesse (m/s)
Feu décroissant 2b	7	10	3
	8	20	4
	9	0	0
	10	50	1
	11	100	2
	12	70	2
Moyenne		42	2,4

Tableau 8 : Vitesse et direction du vent durant la phase de décroissance

Pour cette phase, la détermination précise de la classe de stabilité est plus complexe car c'est très certainement au cours de cette phase qu'il y a eu un changement important de stabilité : en effet, les conditions de stabilité de la nuit (phase 2a) sont plutôt de type stable (E et F) et celles de jours (phase 2b) en été sont plutôt de type instable (A ou B) ; La transition se faisant dans la matinée. Par conséquent, ces 4 classes météorologiques ont été retenues pour les modélisations.

Concernant la direction du vent, les variations ont été importantes, avec un secteur moyen axé à 42° et des variations de plus ou moins 50°.

Le moment du passage des conditions de vent stable aux conditions instables n'est pas connu avec précision. Il semble pouvoir être situé vers 8h, d'après les observations de terrain recueillies (Annexe 2)⁴.

3.3.3 POUR LA PHASE DE FEU COUVANT

Pour la phase de feu couvant, il a été plus difficile de définir une vitesse de vent et une direction stable comme le montrent les valeurs présentées dans le Tableau 6

⁴ Parmi ces observations, l'observation d'une épaisse fumée au niveau du sol à 2 km au Sud-Ouest du site dès 8h30 se rapporte à une situation de vent instable, d'après les résultats de la modélisation rapportés ci-après (2b).

qui regroupent toutes les valeurs utilisées pour les conditions météorologiques observées du lundi 27/06 au samedi 2 juillet.

Il peut toutefois être distingué 2 sous-phases :

- La première (3a) qui débute après la phase de décroissance le 27/06 à 12 h et qui se termine le 29/6 à 8h – la vitesse moyenne sur cette phase est de 1,6 m/s
- La deuxième (3b) qui débute le 29/6 à 8h et qui se termine le 30/06 à 24 h. – la vitesse moyenne sur cette phase est de 4,6 m/s.

Conformément à la remarque formulée précédemment, il eut également été possible de la prolonger jusqu'au 2/7 à 8h (3c). – la vitesse moyenne sur cette phase aurait alors été de 4,8 m/s.

Concernant la direction du vent lors de la phase de feu couvant, le vent a changé plusieurs fois de direction:

- Durant la phase 3a, il n'y a eu aucune direction privilégiée. Toutes les directions sont à peu près équiprobables. Ceci signifie qu'a priori le temps d'exposition pour une personne ne se déplaçant pas est inférieur à 1 heure. En revanche, pour une personne se déplaçant, il n'est pas possible de déterminer le temps d'exposition (ce dernier dépendra notamment du mode de transport).
- Durant les phases 3b et 3c, un secteur angulaire se détache clairement, il est compris entre 260° et 310° comme le montre la Figure 1.

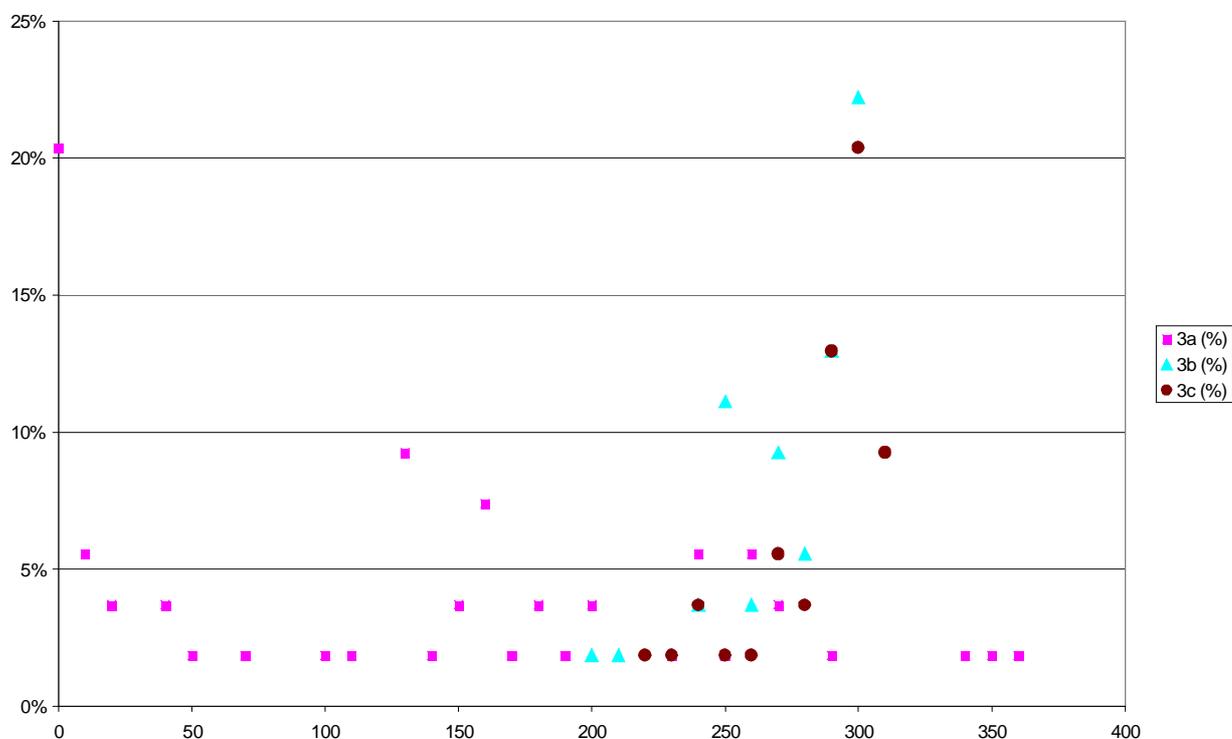


Figure 1 : Répartition de la direction du vent pour les différentes sous phases de du feu couvant.

En effet, la figure précédente montre que du 29/6 au 30/6, le vent est resté pendant plus de 82% du temps de secteur compris entre 260° et 310°. C'est donc dans les directions opposées que l'observation d'effets potentiels est la plus probable lors de la phase de feu couvant.

3.3.4 SYNTHÈSE

A partir de ces informations transmises par MétéoFrance et Air LR, le parti a été pris de retenir les conditions météorologiques présentées dans le Tableau 9.

Phase	N°	date	durée	Météo	Secteur au sol
Développée	1	27/06 de 3h30 à 7h	3 heures 30	Stable: E2-F2	10°
Décroissance	2	27/06 de 7h à ~ 8h	~ 1 heure	Stable: E2-F2	10
	2b	27/06 de ~ 8h à 12 h	~ 4 heures	Instable: A2-B2	45° (0-100°)
Feu couvant	3a	Du 27/06 12h au 29/6 8h	44 heures	Instable:A2-B2	Vent tournant
	3b	Du 29/06 8h au 30/06 24h	40 heures	Neutre: B5-C5-D5	260° à 310°

Tableau 9 : Conditions météorologiques retenues pour les modélisations

3.3.5 INFLUENCE DE LA DIRECTION DU VENT

3.3.5.1 POUR CHAQUE PHASE

Concernant l'influence de la direction du vent sur les résultats, il est utile de rappeler que le modèle utilisé n'intègre pas ces variations, car cet outil est destiné en priorité à la détermination de distances d'effet associées à de courtes expositions de l'ordre de l'heure environ. De plus, le fait de considérer la direction du vent comme constante revient à se placer dans le cas le plus pénalisant.

Ceci étant, en se basant sur les informations météorologiques disponibles et sur la cinétique de l'incendie, il peut être estimé que l'hypothèse de direction quasi-constante est acceptable durant la phase d'incendie développé et la phase de décroissance. En effet, ces phases sont relativement courtes et le vent était faible (moins de 2 m/s).

En revanche, lors de la phase 3a de feu couvant, le vent n'a pas eu de direction privilégiée, les durées d'exposition à considérer pour cette phase sont donc inférieures à la durée de la phase.

Pour la phase 3b, la direction du vent a été stable, il convient dès lors de considérer une durée d'exposition équivalente à la durée de la phase 3b.

3.3.5.2 SUR LA LARGEUR DU PANACHE

Concernant la zone impactée au sol, il est illusoire de chercher à déterminer des zones finement délimitées. En effet, compte tenu, des variations de puissance de l'incendie et des changements importants de direction de vent (notamment lors de la phase 3a), le panache a fortement évolué en direction et en forme au cours de la période étudiée. Par conséquent, il a été délibérément choisi de ne pas représenter des champs d'isoconcentrations en fumées et de ne représenter que l'évolution de la concentration sur l'axe du panache au niveau du sol.

Toutefois, pour donner un ordre d'idée de la largeur du panache à différentes distances de la source, le Tableau 10 présente pour quelques distances et quelques conditions météorologiques la demi largeur de panache où 50% et 80% de la concentration sur l'axe seraient observées.

distance (km)	1 / 2 largeur panache (km)			
	classe A		classe D	
	75% C_{axe}	50% C_{axe}	75% C_{axe}	50% C_{axe}
0.5	0.17	0.27	0.10	0.15
2	0.31	0.48	0.18	0.28
4	0.42	0.65	0.24	0.38

Tableau 10 : Demi largeur du panache pour plusieurs conditions de stabilité

Les classes A et D ont été retenues car elles constituent les 2 cas extrêmes en terme de largeur de panache. Les conditions instables (A et B) conduisent à la formation des panaches les plus larges et les neutres (C et D) à stables (E et F) conduisent aux panaches les plus étroits.

La définition des différentes grandeurs évoquées précédemment est donnée sur la Figure 2.

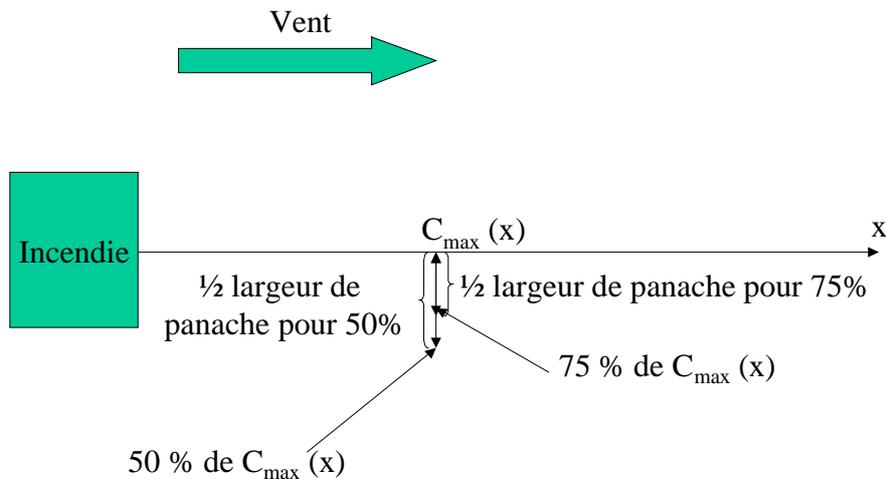


Figure 2 : Représentation schématique des différentes grandeurs

3.4 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FUMÉES SUR L'AXE DU PANACHE AU NIVEAU DU SOL POUR LES DIFFÉRENTES PHASES

Moyennant ces hypothèses, l'évolution des concentrations en fumées au niveau du sol a été déterminée sur l'axe du panache sous le vent, c'est-à-dire à l'endroit où les concentrations sont maximales.

A ce stade du document, il est important de rappeler que les concentrations fournies dans les courbes suivantes sont celles des fumées d'incendie. Ces fumées comportent toutes les substances toxiques recensées au paragraphe 2.2.2.2 mais également de nombreuses substances non toxiques telles que l'air entraîné.

Par ailleurs, compte tenu de la résolution du calcul, il peut être estimé que les calculs au niveau du sol sont quasi-identiques à celles qui seraient observées à hauteur d'homme.

Par conséquent, pour obtenir en chaque point des courbes présentées la concentration d'une substance toxique particulière, il faut multiplier la concentration en fumées par la fraction massique correspondante à la substance toxique fournie dans le Tableau 4.

Concernant les figures suivantes, le parti a été pris de ne pas représenter les 100 premiers mètres de calcul dans la mesure où le modèle gaussien n'est pas validé dans cette zone.

Les 5 figures suivantes présentent les résultats obtenus pour les 3 phases de l'incendie.

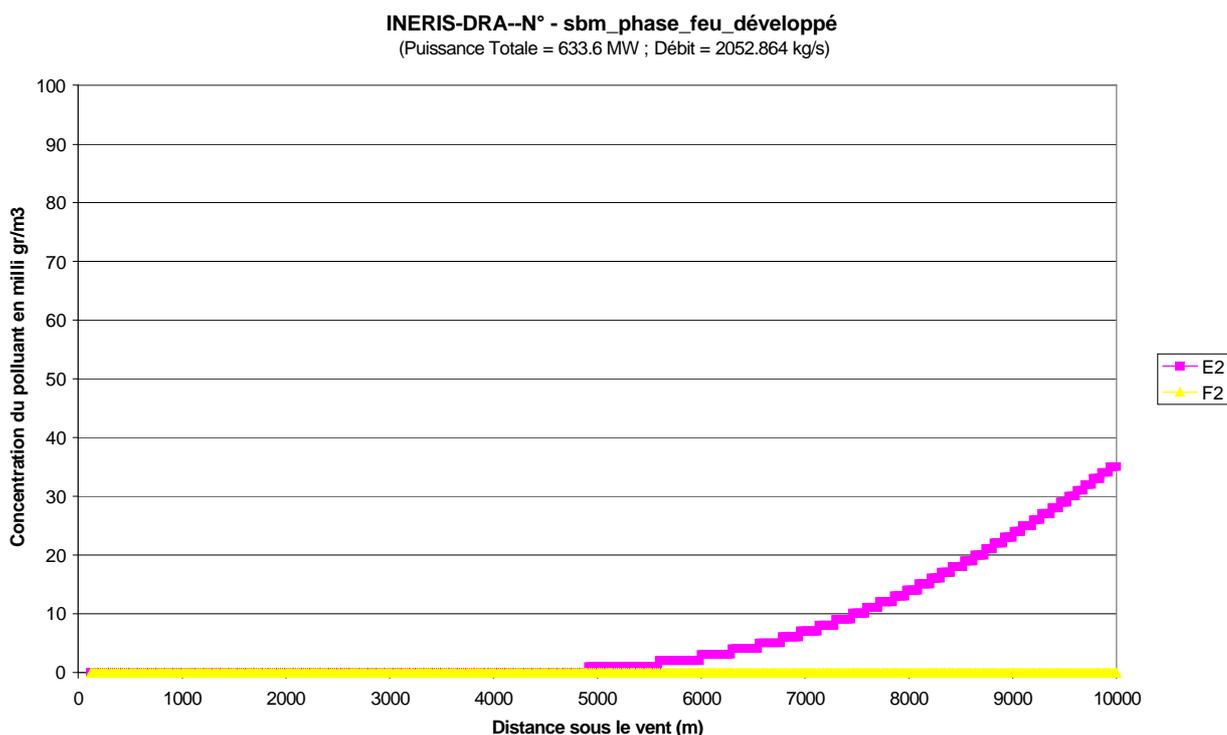


Figure 3 : Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 1 de feu développé

Pour cette phase, les concentrations au sol sont très faibles car le panache s'est établi en altitude où il s'est dispersé sur une grande distance. Pour cette phase, le modèle de dispersion employé ne permet d'estimer précisément la distance à laquelle la concentration maximale est atteinte. En effet, le modèle employé n'est valide que jusqu'à 10 km. Ceci étant, les valeurs calculées sont très faibles en regard des différents seuils retenus par la suite.

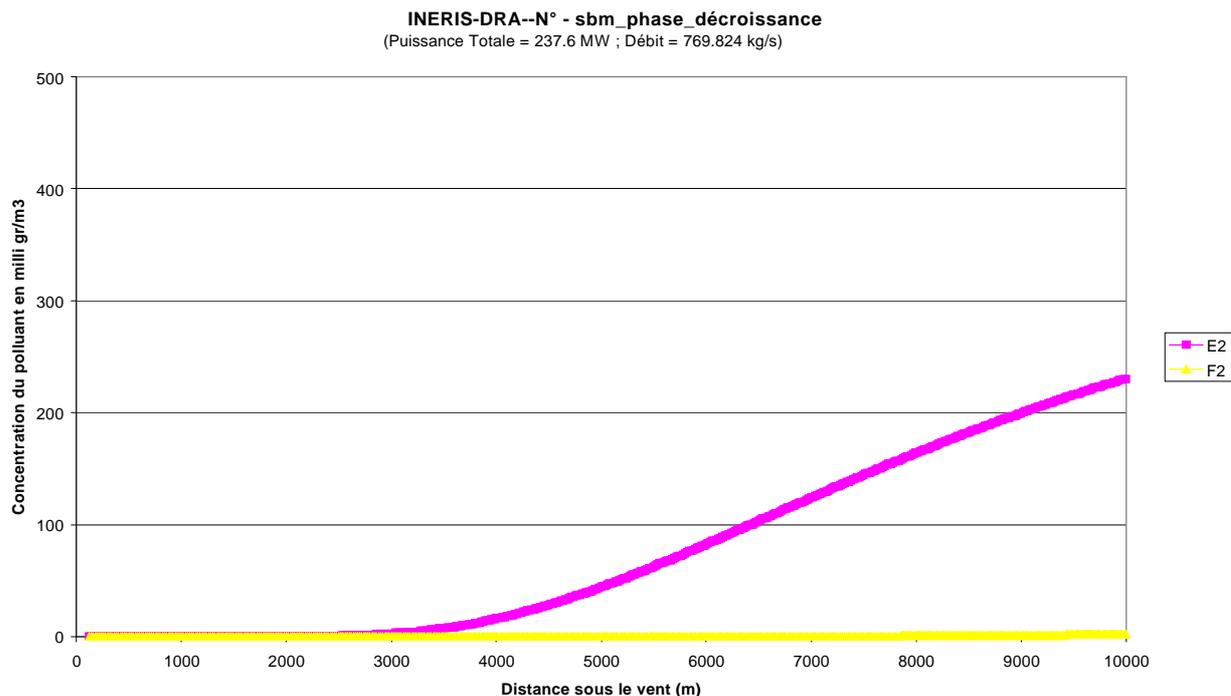


Figure 4 : Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 2a de feu décroissant pour des conditions météorologiques stables

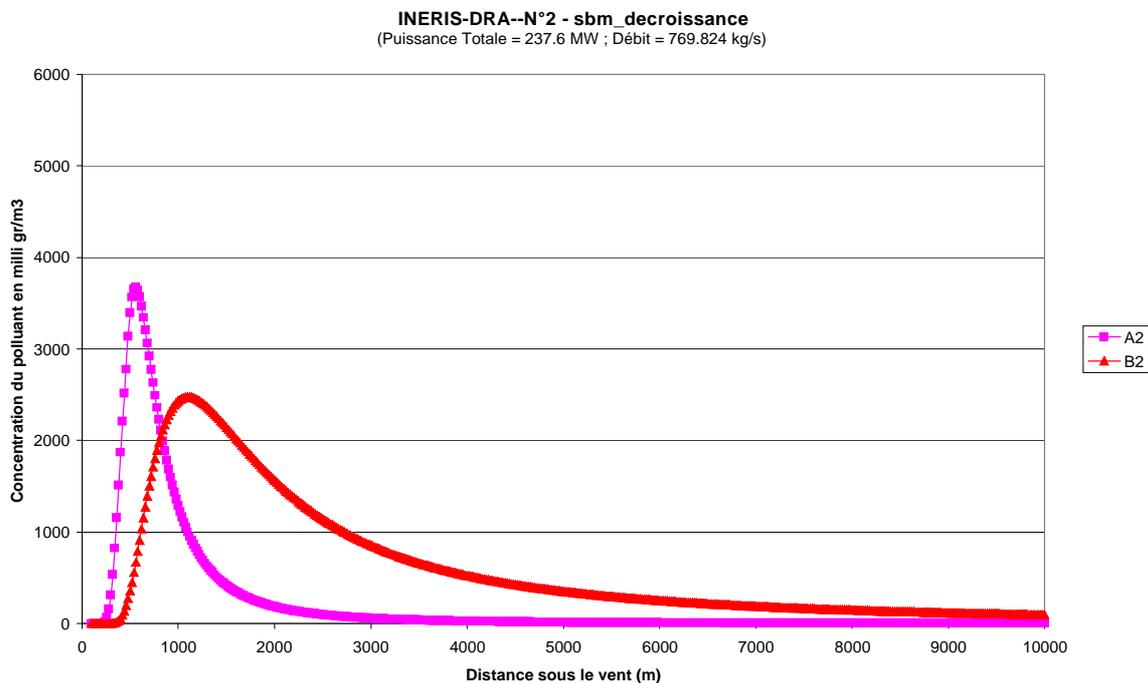


Figure 5 : Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 2b de feu décroissant pour des conditions météorologiques instables

Les courbes montrent que la concentration en fumées la plus forte est de l'ordre de 3 600 mg/m³ et qu'elle est atteinte lors de la phase de feu décroissant à 450 m du foyer.

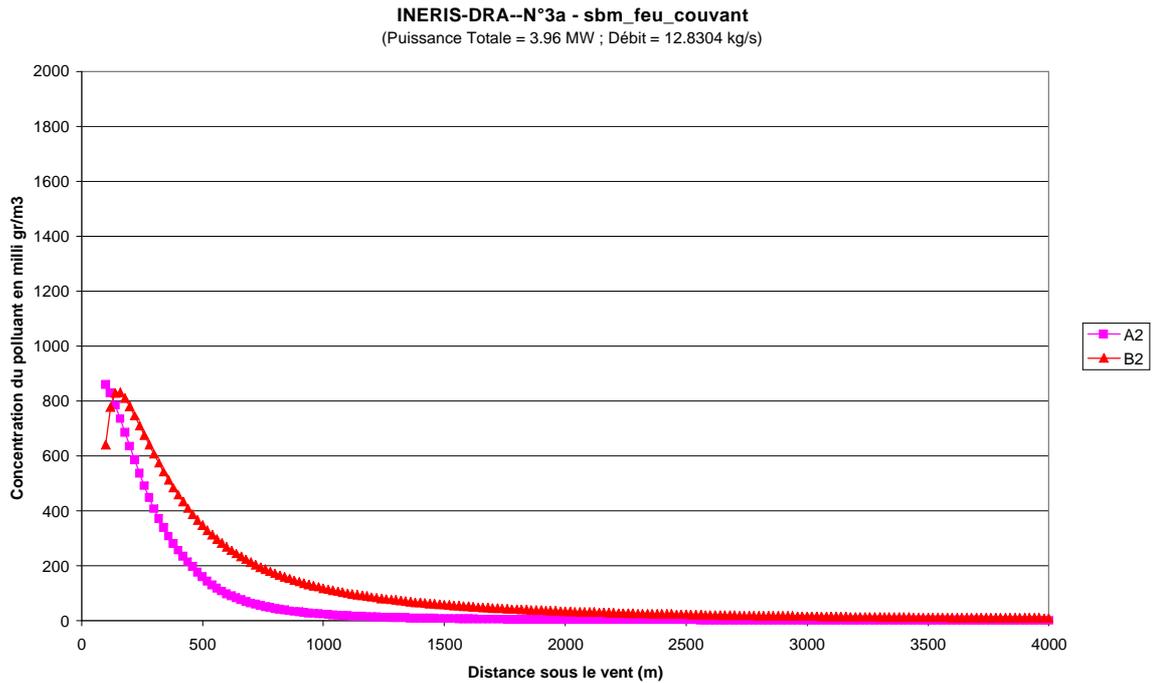


Figure 6 : Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 3a du feu couvant

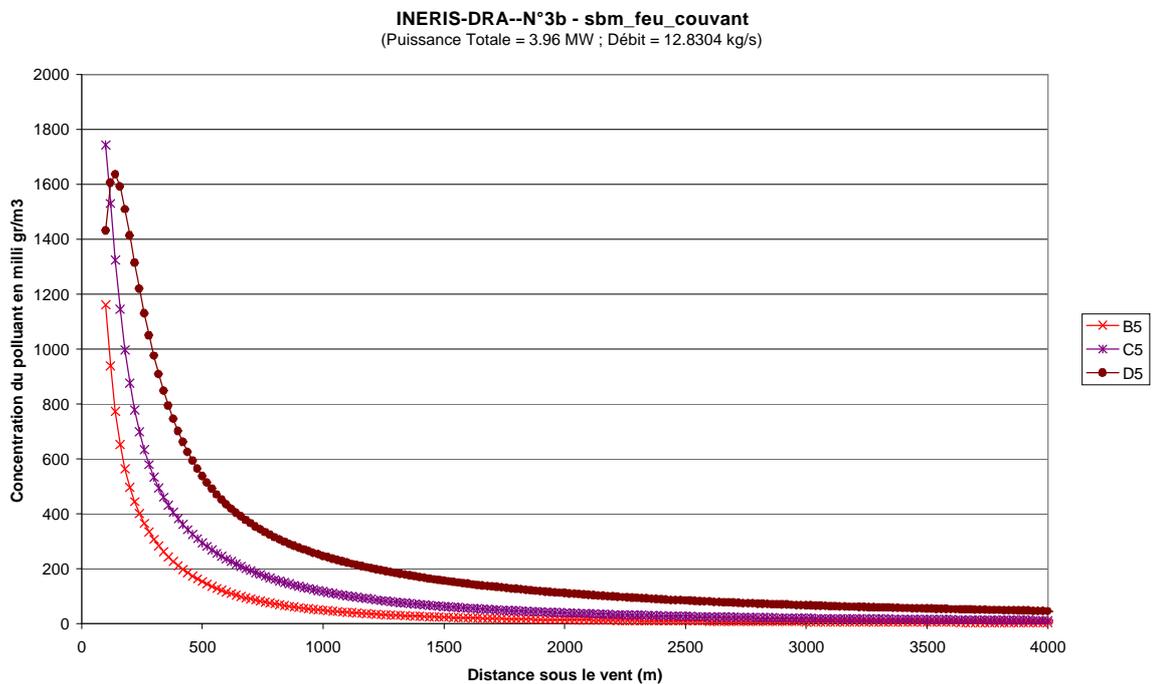


Figure 7 : Concentration sur l'axe du panache au sol lors de la phase 3b du feu couvant

De fait, pour les différentes phases, les concentrations maximales sont décrites dans le Tableau 11.

Phase de l'incendie	Concentration maximale de fumées modélisée (mg/m ³)	Distance d'impact principal	Durée
Feu développé	40 à 10 km*	> 5 km	3 heures 30
Feu décroissant, a	230 à 10 km*	> 5 km	~ 1 heure
Feu décroissant, b	Entre 2500 et 3600	400 m à 2 km	~ 4 heures
Feu couvant, a	Environ 850	≤ 1 km	44 heures
Feu couvant, b	Environ 1800	≤ 1 km	40 heures

* Compte tenu de l'inflexion de la courbe avant 10 km et d'après notre compréhension du phénomène de panache en altitude, il n'est pas attendu d'augmentation importante des teneurs au delà des 10 km modélisés.

Tableau 11 : Concentrations maximales de fumées modélisées au niveau du sol

Les concentrations maximales en fumées sont retranscrites en concentration pour chacun des composés toxiques dans le Tableau 12.

Phase	1	2a	2b	3a	3b
Fumées	40	230	3 600	850	1 800
HBr	0,001	0,006	0,058	0,014	0,029
CO	0,111	0,64	10,008	2,363	5,004
HCl	0,044	0,25	3,924	0,927	1,962
HCN	0,009	0,05	0,850	0,201	0,425
NO2	0,016	0,09	1,451	0,343	0,725
HF	0,005	0,03	0,428	0,101	0,214
SO2	0,087	0,50	7,848	1,853	3,924

Tableau 12 : Concentrations maximales calculées pour les différentes phases (mg/m³)

Concernant les phases 3a et 3b, ces valeurs maximales ont été atteintes à environ 150 m de la source, c'est-à-dire dans la zone où se situait la mini-remorque d'Air Languedoc Roussillon. De fait, il est possible de comparer ces valeurs calculées et celles mesurées, c'est l'objet du paragraphe suivant.

3.5 COMPARAISON AVEC LES DONNEES RECUEILLIES LORS DE L'INCENDIE

3.5.1 AIR LR

Les maxima mesurés par AIR Languedoc Roussillon sont regroupés dans le Tableau 13.

Phase	3b		3c	
Date	29/06	30/06	01/07	02/07
CO	1.3	1.3	0.5	0.7
NO ₂	0.035	0.054	0.035	0.039
SO ₂	0.419	0.439	0.245	0.345

Tableau 13 : Concentrations maximales relevées par la mini remorque de AIR LR

La comparaison de ces valeurs avec celles calculées montre que les calculs donnent un ordre de grandeur correct par excès des valeurs réellement mesurées. Le facteur de surestimation est de l'ordre de 10. Cette valeur n'est pas surprenante car les valeurs d'AIR LR ont été mesurées en un point fixe qui n'a pas été toujours situé sur l'axe du panache. Par conséquent, les mesures en un point donné sont toujours inférieures ou égales à celles calculées sur l'axe du panache (égales lorsque ce point est sur l'axe, inférieures lorsque ce point n'est pas sur l'axe).

3.5.2 DONNEES RECUEILLIES PAR LES POMPIERS

Les données recueillies par les pompiers sont essentiellement qualitatives dans la mesure où il s'agissait principalement de déterminer la nature des substances émises. Il apparaît que les substances identifiées comportent surtout du soufre (CS₂ ou SO₂) ainsi que du CO. Ces informations corroborent bien les hypothèses de calcul effectuées par l'INERIS. En effet, ce sont ces deux composés toxiques (SO₂ et CO) qui sont majoritairement présents dans la composition des fumées.

Par ailleurs, dans le document reçu, il y a peu d'indications par rapport à la position des points de prélèvements : au plus près du foyer ou dans la zone plus lointaine. De fait, il n'a pas été possible de comparer les valeurs mentionnées avec les résultats de calcul.

Par ailleurs, les calculs de dispersion réalisés sont en accord avec les observations (Annexe 2), notamment des pompiers en ce qui concerne le comportement du panache le jour de l'incendie: un panache qui s'élève en altitude et qui se prolonge sur de longues distances. Ce comportement est typique des conditions de stabilité de type E ou F.

3.5.3 AUTRES OBSERVATIONS

Les résultats de la modélisation effectuée sont cohérents avec les autres informations suivantes (Annexe 2):

- Nuage dense de fumées au niveau du sol à 2 km au Sud-Ouest du site le 27.06.05 dans la matinée;

- Odeurs à grande distance à l'Ouest (jusque Carcassonne à 70 km)⁵.

En revanche, la modélisation effectuée ne rend pas compte de l'étalement des fumées au sol et des fumées importantes dans la zone d'activité le 27.06.05 dans la matinée: cela peu être lié aux limites de validité du modèle pour les très faibles distances. Une superposition de plusieurs régimes de feu sur la surface très étendue de l'entrepôt dans la phase de feu décroissant peut aussi être envisagée, avec la présence éventuelle de feu couvant sur des zones de l'entrepôt. Cela revient à un élargissement dans le temps de la phase de feu couvant 3a sur la phase de feu décroissant, et ne remet donc pas en cause les conclusions de l'étude.

3.5.4 CONCLUSIONS SUR LES MODELISATIONS

Compte tenu des diverses observations et mesures recueillies, il peut être estimé que les valeurs calculées constituent un bon ordre de grandeur des concentrations qui ont pu être observées lors de l'incendie.

⁵ Une évaluation quantitative des impacts olfactifs n'est pas réalisée dans la présente étude, car les substances prises en compte dans la modélisation ne sont pas forcément les plus odoriférantes: de faibles quantités d'autres substances telles que des mercaptans peuvent occasionner une détection olfactive qui ne serait pas prévue sur la base de la modélisation effectuée.

4 SEUILS D'EFFET RETENUS

Pour déterminer l'impact potentiel sur les personnes, plusieurs types d'effets sont considérés, suivant la durée des expositions, et donc plusieurs seuils d'effet. L'expertise toxicologique de l'INERIS conduit à considérer pertinentes certaines sources de seuils, qui seront détaillées dans les paragraphes suivants, et qui aboutissent aux types d'effets et durées associées reportées dans Tableau 14.

Types d'effets	Durée d'exposition	Phase d'incendie concernée
Aigus irréversibles (létalité et irréversibilité)	≥ 30 mn, ≤ 2 h	Chacune
Aigus réversibles	≥ 10 mn, ≤ 2 h	Chacune
Sub-aigus (réversibles)	≥ 24 h, ≤ 15 jours	A partir de la 2 ^e phase de feu décroissant, en tenant compte de la fréquence sous le vent

Tableau 14 : Types d'effets considérés

Les seuils des effets irréversibles sont ceux classiquement recherchés dans le cadre des études de dangers.

Par ailleurs, les seuils limites d'exposition professionnelle sont également pris en compte.

4.1 POUR LES EFFETS IRREVERSIBLES

Concernant les effets irréversibles et les effets létaux, les seuils sont déterminés à partir des seuils existants pour chacun des composants toxiques des fumées et ils dépendent bien évidemment du temps d'exposition. En effet, plus la durée d'exposition est courte, plus la concentration doit être élevée pour observer un effet donné (Loi d'Haber dans le cas des expositions courtes, c'est-à-dire inférieure à 2 h).

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 P₁, P₂, ..., P_i, ..., P_n, un seuil « équivalent » qui peut être estimé au moyen de la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(\text{Concentration du polluant } P_i)}{(\text{Seuil du polluant } P_i)} = \frac{1}{\text{Seuil}_{\text{équivalent}}}$$

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. Cette démarche est celle retenue dans le cadre des études dangers. Dans un souci de cohérence avec les résultats présentés pour les autres effets, le parti a été pris de présenter également le seuil de chaque toxique isolé ainsi que sa conversion en concentration de fumées.

Il est à noter que dans certains cas, la concentration initiale dans les fumées est inférieure au seuil d'effet. Pour ces valeurs, il n'est donc pas possible d'observer ces effets en considérant cet unique composé.

Pour les seuils à retenir pour chaque substance les valeurs disponibles sur le site Internet de l'INERIS (www.ineris.fr) ont été retenus.

Pour les effets létaux, les seuils d'effet intrinsèques et convertis en concentration en fumées sont donnés dans le Tableau 15.

Produit	30 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)	60 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)	120 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)
HBr	660	-	331	-	166	-
HCN	66	279 661	45	190 678	31	131 356
CO	4812	-	3666	1 318 705	2635	947 842
HCl	701	643 119	358	328 440	187	171 560
HF	309	-	155	1 302 521	77	647 059
NO ₂	151	374 690	132	327 543	113	280 397
SO ₂	1703	781 193	1310	600 917	996	456 881
Mélange		99 337		68 583		45 675

Tableau 15 : Seuils d'effet létaux des différents produits isolés et du mélange

Pour les effets irréversibles, les seuils d'effet intrinsèques et convertis en concentration en fumées sont donnés dans le Tableau 16.

Produit	30 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)	60 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)	120 minutes d'exposition	Concentration correspondante (mg/m ³)
HBr	99	-	33	-	11	687 500
HCN	55	233 051	49	207 627	42	177 966
CO	1718	617 986	916	329 496	458	164 748
HCl	119	109 174	60	55 046	30	27 523
HF	164	1 378 151	82	689 076	41	344 538
NO ₂	94	233 251	75	186 104	60	148 883
SO ₂	262	120 183	197	90 367	144	66 055
Mélange		35 009		22 526		13 471

Tableau 16 : Seuils d'effet irréversibles des différents produits isolés et du mélange

4.2 POUR LES EFFETS REVERSIBLES DE COURTE DUREE

Concernant les effets aigus de type réversible, une démarche équivalente peut être mise en œuvre. La principale différence réside dans le fait que le parti est pris de ne pas additionner les effets lorsque ces derniers ne touchent pas les mêmes parties du corps humain.

4.2.1 TYPES D'EFFETS REVERSIBLES DE COURTE DUREE ASSOCIES AUX SUBSTANCES

Le niveau d'information toxicologique vis à vis des polluants considérés est hétérogène. Les informations disponibles sont présentées ci-dessous. Les effets recensés sont récapitulés dans le Tableau 17.

Pour le SO₂, des études épidémiologiques dans les pays occidentaux ont montré une exacerbation des symptômes chez les sujets asthmatiques lorsque la concentration de SO₂ dépasse 250 µg/m³. D'autre part, dans les études européennes récentes, un niveau journalier de 50 µg/m³ en moyenne annuelle sans dépassement d'une concentration de 125 µg/m³ (= 0,04 ppm), augmente les taux de mortalité quotidienne (totale, cardiovasculaire et respiratoire), les admissions hospitalières d'urgence pour causes respiratoires et les maladies chroniques d'obstruction bronchique (BPCO). Dans certaines études, ces effets persistent après ajustement sur la présence de particules. Généralement ces études ne trouvent pas de seuil sans effet pour le SO₂. En fonction de toutes ces connaissances, la valeur recommandée par l'OMS depuis 1999⁶ est de 125 µg/m³ pour une moyenne sur 24 heures. Elle a été établie sur la base d'un LOAEL (= 250 µg/m³) pour les effets respiratoires avec application d'un facteur d'incertitude de 2 pour l'utilisation d'un LOAEL. Même si des études récentes ont mis en évidence des effets délétères pour des niveaux d'exposition de SO₂ inférieurs, l'OMS ne les a pas prises en considération estimant qu'il existe une incertitude sur le fait que le SO₂ soit alors le seul polluant à l'origine des effets sanitaires observés. Par ailleurs, sur la base d'études d'exposition contrôlée chez des asthmatiques, l'OMS recommande que la concentration de 500 µg/m³ (soit 0,175 ppm) ne soit pas dépassée sur une période de 10 minutes. Pour sa part, l'ATSDR propose une VTR pour l'inhalation aiguë de SO₂ égale à 0,01 ppm, (26 µg/m³). Elle est fondée sur des études d'exposition contrôlée chez des volontaires asthmatiques montrant une bronchoconstruction avec réduction des fonctions respiratoires (LOAEL = 0,1 ppm, soit 260 µg/m³). Un facteur d'incertitude de 9 est pris en compte (3 pour la variabilité interindividuelle, 3 pour l'utilisation d'un LOAEL). Aux facteurs d'incertitude près, les VTR de l'OMS et de l'ATSDR sont fondées sur les mêmes type d'étude et sont dérivées de manière analogue. En l'absence de critère objectif permettant de privilégier l'utilisation de l'un ou de l'autre de ces seuils, nous proposons de retenir celui de l'OMS car les valeurs réglementaires nationales ou européennes ainsi que les recommandations émanant du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France tendent vers une valeur identique à celle proposée par l'OMS. Selon les critères nationaux de la qualité de l'air (décret du 15 février 2002) et la directive européenne du 22 avril 1999, la moyenne journalière en SO₂ de 125 µg/m³ ne doit pas être dépassée plus de 0,8 % du temps (soit 3 jours) ; le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France recommande pour sa part dans son avis du 1^{er} octobre 1997 une Valeur Limite de 125 µg/m³ en Moyenne Journalière des valeurs horaires. A souligner enfin, l'agence CalEPA propose pour une durée d'exposition de 1 heure une VTR de 0,66 mg/ m³ dérivée d'études chez des asthmatiques. Les signes décrits sont de type irritation respiratoire avec des troubles de la fonction respiratoire.

⁶ Elle est identique aux recommandations de 1987 mais n'est plus liée à la présence de particules.

Les études chez l'animal montrent rarement d'effet pour des concentrations en NO₂ inférieures à 1 880 µg/m³ (1 ppm). Chez les personnes saines exposées au repos ou au cours d'activité légère et pendant moins de 2 heures à une concentration de 4 700 µg/m³ (2,5 ppm) apparaît une réduction prononcée des fonctions pulmonaires, mais généralement elles ne sont pas affectées par des concentrations de 1 ppm. Dans les études expérimentales, les personnes atteintes d'obstruction bronchique chronique sont légèrement affectées par une exposition de plus de trois heures à une concentration de 560 µg/m³ (0,3 ppm). Les asthmatiques sont les plus sensibles à cet effet puisqu'une réduction des fonctions pulmonaires est parfois obtenue après une exposition de 30 minutes à 0,3 ppm de NO₂. Ces résultats sont peu reproductibles et les mécanismes d'effets encore assez mal connus. Sur la base d'un LOAEL (365-565 µg/m³ ou 0,2 à 0,3 ppm) pour une diminution des fonctions pulmonaires observée chez les sujets asthmatiques et les patients souffrant de bronchopathie pulmonaire chronique obstructive, l'OMS recommande de ne pas dépasser la valeur moyenne horaire de 0,2 mg/m³ de NO₂. Un facteur d'incertitude de 2 a été retenu. Pour sa part, l'agence CalEPA propose pour une durée d'exposition de 1 heure une VTR de 0,47 mg/m³. Les effets indésirables associés sont une irritation des voies respiratoires chez les sujets asthmatiques (augmentation de la réactivité des voies respiratoires). Les VTR proposées par l'OMS et CalEPA sont similaires ; seuls les facteurs d'incertitude pris en compte conduisent à une valeur de l'OMS plus protectrice pour la santé humaine.

Pour HF, l'OEHHA propose, pour une exposition de 1 heure, une VTR de 0,24 mg/m³ associée à une irritation des voies aériennes supérieures (nez, gorge) et des yeux fondée sur une étude chez des volontaires adultes sains. Un facteur d'incertitude de 10 est pris en compte pour la variabilité interhumaine (prise en compte des sujets sensibles). L'ATSDR propose, pour une durée d'exposition de 24 heures, une VTR de 0,015 mg/m³ fondée sur la même étude d'exposition contrôlée chez l'homme que celle retenue par CalEPA. L'ATSDR applique un facteur d'incertitude de 30 pour l'utilisation d'un LOAEL et la variabilité interhumaine.

Concernant HCN, seule l'agence californienne propose une VTR de 0,34 mg/m³ associée pour une durée d'exposition de 1 heure à des effets sur le système nerveux central. Cette étude est fondée sur une étude chez des singes indiquant une perte de la coordination et de la conscience liée à une hypoxie. Un facteur d'incertitude de 100 est appliqué pour la prise en compte de la variabilité inter et intra-espèces.

Seule l'agence californienne propose également une VTR pour l'acide chlorhydrique (2,1 mg/m³ pour une durée d'exposition d'une heure). Elle est fondée sur une étude d'exposition contrôlée chez de jeunes adultes asthmatiques (18-25 ans) indiquant une irritation oculaire et respiratoire se manifestant notamment par une douleur au niveau de la gorge et des éternuements.

Le CO est un gaz diffusant rapidement à travers les membranes alvéolaires, capillaires et placentaires et s'associant à l'hémoglobine pour former la carboxyhémoglobine (COHb). Le CO possède une affinité pour l'hémoglobine 250 fois plus forte que l'oxygène. La formation de COHb réduit le transport d'oxygène et cause des sous-oxygénations tissulaires à faible dose.

A plus forte dose, les effets portent sur les organes les plus consommateurs en oxygène : cerveau, cœur, muscles et fœtus. L'empoisonnement au CO peut survenir à partir de 5 % de COHb chez le sujet sain avec pour effet des déficiences neurologiques immédiates et à long terme. Dans les essais expérimentaux chez des sujets atteints de maladies coronariennes un taux de 2,5 % de COHb peut provoquer une défaillance ventriculaire. Chez le sujet sain, la production endogène de CO donne un niveau de COHb variant entre 0,4 et 0,7 %. Pendant la grossesse, cette production endogène est augmentée. Elle conduit à des taux de COHb compris entre 0,7 et 2,5 % ; ces taux sont 10 à 15 % plus élevés chez le fœtus. Il existe une relation bien établie et probablement causale entre un faible poids de naissance et un niveau de COHb de 2 à 10%. Selon l'OMS, la valeur de 2,5 % de COHb –valeur pouvant provoquer une défaillance cardiaque chez les sujets souffrant de maladie coronarienne-, ne peut être dépassée si les concentrations dans l'air ne dépassent pas 10 mg/m³ en moyenne sur 8 h, 30 mg/m³ en moyenne sur 1 h, 60 mg/m³ en moyenne sur 30 minutes, 100 mg/m³ (= 90 ppm) en moyenne sur 15 minutes. Pour une durée d'exposition de 1 heure, l'agence CalEPA propose une VTR de 23 mg/m³ associée à une augmentation des défaillances cardiaques et autres troubles cardiovasculaires chez les sujets atteints de pathologies cardiaques exerçant une activité physique intense. Le seuil proposé par l'agence californienne est très proche de celui proposé par l'OMS pour la même durée d'exposition (30 versus 23 mg/ m³).

Enfin, pour HBr, la seule information disponible est une Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP) américaine.

Composé	Effets (H, A)	Source
SO ₂	Respiratoire : ↘ fonctions respiratoires chez asthmatiques (H) Respiratoire : bronchoconstriction (chez asthmatiques) (H) Irritation respiratoire (chez asthmatiques) (H)	OMS 1999 ATSDR 1998 OEHHA 1999
NO ₂	Respiratoire : ↘ fonctions respiratoires chez asthmatiques et sujets souffrant de BPCO (H) Irritation respiratoire chez asthmatiques (H)	OMS 1999 OEHHA 1999
HF	Respiratoire : irritation des voies supérieures (H) Irritation oculaire et respiratoire (nez, gorge) (H)	ATSDR 2003 OEHHA 1999
HCN	Système nerveux central (perte de la coordination) (A)	OEHHA 1999
HCl	Irritation oculaire et respiratoire chez de jeunes adultes asthmatiques (H)	OEHHA 1999
CO	Défaillance cardiaque chez sujets souffrant de maladie coronarienne (H) Défaillance cardiaque chez les sujets atteints de maladies cardiovasculaires exerçant une activité physique intense (H)	OMS 1999 OEHHA 1999

(H) = établi à partir d'étude chez l'homme (A) = établi à partir de données animales

Tableau 17 : Types d'effets réversibles de courte durée associés aux substances

Les différences observées entre les VTR (ATSDR, OMS et OEHHA) et les valeurs seuils (SER, ERPG, AEGL, IDLH) tiennent, notamment, au fait que les études n'ont pas été conduites sur les mêmes populations : population humaines ou animales, saines ou sensibles (asthmatiques, cardiaques etc.). Cette distinction sera reprise dans l'évaluation ci-après

Dans l'optique de déterminer si la population a pu ressentir des effets dus à l'exposition aux substances dégagées lors de l'incendie, il semble intéressant de prendre en compte ces populations sensibles. Toutefois, il faut bien noter que la valeur concernant la population générale reste digne d'intérêt et que les effets critiques pris en compte pour déterminer les « effets réversibles » sont considérés comme des signes cliniques légers.

4.2.2 POUR LES EFFETS REVERSIBLES AIGUS (POPULATION GENERALE)

Concernant les effets aigus (durée d'exposition inférieure à 8 heures) de type réversibles, la démarche suivante a été appliquée ⁷:

- (1) En premier lieu, les valeurs seuils pour des effets réversibles (SER) ont été recherchées dans les rapports « Seuils de toxicité aiguë » rédigés par l'INERIS et validés par le MEDD (rapports consultables sur le site Internet de l'INERIS (www.ineris.fr)). Le SER correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle la population exposée peut présenter des effets réversibles.
- (2) En absence de valeurs françaises, les valeurs ERPG-1 (Emergency Response Planning Guidelines) publiées aux Etats-Unis par l'AIHA (American Industrial Hygienist Association) ont été recherchées. L'ERPG-1 correspond à la concentration atmosphérique maximale en-dessous de laquelle il est probable que presque tous les individus pourraient être exposés pendant plus d'une heure sans effet transitoire léger ni détection d'une odeur.
- (3) Dans le cas où il n'existe pas de valeurs ERPG, les valeurs AEGL-1 (Acute Exposure Guideline Levels) ont été retenues. L'AEGL-1 correspond à la concentration atmosphérique d'une substance au-dessus de laquelle il est estimé que la population générale (incluant les individus « susceptibles » mais excluant les individus « hypersensibles ») pourrait ressentir une gêne importante. Les concentrations atmosphériques inférieures à la valeur A.E.G.L – 1 représentent des niveaux d'exposition qui pourraient produire une odeur, un goût, ou d'autres sensations d'irritation.
- (4) Enfin, si aucune des valeurs précédentes n'est disponible, la valeur de l'IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) pourra être retenue. Le NIOSH explique que les concentrations IDLH ont été établies pour s'assurer que, dans le cas d'un bris de leur équipement de protection respiratoire, les travailleurs puissent s'échapper d'une exposition à des toxiques chimiques sans dommages réversibles ou irréversibles pour leur santé.

⁷ Une VTR envisageable de l'OEHHA de 0,34 mg/m³ pour le HCN pour une durée de une heure est écartée ici du fait d'un facteur d'incertitude comparativement très élevé (100).

Les seuils de toxicité ainsi obtenus pour les effets réversibles aigus sur la population générale sont reportés dans le Tableau 18, avec comme précédemment leur traduction en concentrations de fumées.

Composé	Seuils (mg/m ³)	Durée d'exp. (min)	Source	Fraction massique dans les fumées	Concentration de fumées correspondante (mg/m ³)
SO ₂	7,8	10	INERIS, 2005 INRS	2,18E-03	3 578
	7,8	20			
	7,8	30			
	7,8	60			
	7,8	120			
NO ₂	10	10	INERIS, 2004 INRS	4,03E-04	24 814
	10	20			
	10	30			
	10	60			
HF	10	10	INERIS, 2003 INRS	1,19E-04	84 034
	6	20			50 420
	4	30			33 613
	0,8	60			6 723
HCN	2,75	10	AEGL, 2002 INRS	2,36E-04	11 653
	2,75	30			
	2,2	60			9 322
HCl	4,5	60	ERPG, 2004 INRS	1,09E-03	4 128
CO	228	60	ERPG, 2004 INRS	2,78E-03	82 014
HBr	21	30	IDLH, 1995	1,60E-05	1 312 500

Tableau 18 : Seuils de toxicité considérés pour les effets réversibles aigus (population générale)

4.2.3 POUR LES EFFETS REVERSIBLES AIGUS (POPULATIONS SENSIBLES)

La plausibilité d'apparition d'effets réversibles sub-aigus pour les populations sensibles est estimée à partir de Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).

Les VTR disponibles que les composés considérés sont présentées dans le Tableau 19, avec comme précédemment leur traduction en concentrations de fumées⁸.

⁸ L'OMS et l'OEHHA proposent en outre des valeurs de 10 mg/m³ et 23 mg/m³ respectivement pour le CO, qui ne sont pas retenues ici car l'effet critique ne paraît pas correspondre au concept usuel d'effet réversible (défaillance cardiaque).

Composé	VTR (mg/m ³)	Durée d'exp. (h)	Effets (H, A)	Facteur d'incertitude ⁹	Source	Fraction massique dans les fumées	Concentration de fumées correspondante (mg/m ³)
SO ₂	0,66	1	Irritation respiratoire (chez asthmatiques) (H)	1	OEHHA 1999	2,18E-03	303
NO ₂	0,2	1	Respiratoire : ↘ fonctions respiratoires chez asthmatiques et sujets souffrant de BPCO (H)	2	OMS 1999	4,03E-04	496
	0,47	1	Irritation respiratoire chez asthmatiques (H)	1	OEHHA 1999	4,03E-04	1 166
HCl	2,1	1	Irritation oculaire et respiratoire chez de jeunes adultes asthmatiques (H)	1	OEHHA 1999	1,09E-03	1 927

(H) = établi à partir d'étude chez l'homme (A) = établi à partir de données animales

Tableau 19 : Valeurs Toxicologiques de Référence pour les effets réversibles aigus (populations sensibles)

4.2.4 POUR LES EFFETS REVERSIBLES SUB-AIGUS (POPULATIONS SENSIBLES)

La plausibilité d'apparition d'effets réversibles sub-aigus est estimée à partir des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).

De telles VTR ne sont disponibles que pour deux des composés considérés. Elles sont présentées dans le Tableau 20, avec comme précédemment leur traduction en concentrations de fumées. Le seuil disponible pour le dioxyde de soufre correspond à des populations sensibles¹⁰. Le seuil pour le fluorure d'hydrogène incorpore un facteur de sécurité pour les populations sensibles.

Composé	VTR (mg/m ³)	Durée d'exp. (h)	Effets	Facteur d'incertitude	Source	Fraction massique dans les fumées	Concentration de fumées correspondante (mg/m ³)
SO ₂	0,125	24	Respiratoire : ↘ fonctions respiratoires chez asthmatiques (H)	2	OMS, 1999	2,18E-03	57
HF	0,015	24	Respiratoire : irritation des voies supérieures (H)	30	ATSDR 2003	1,19E-04	126

(H) = établi à partir d'étude chez l'homme (A) = établi à partir de données animales

Tableau 20 : Valeurs Toxicologiques de Référence pour les effets réversibles sub-aigus

⁹ Facteur par lequel est divisé le niveau issu de l'observation.

¹⁰ La VTR de l'ATSDR pour le SO₂ n'a pas été retenue, du fait d'un facteur d'incertitude incorporé de 9, considéré comme trop important.

4.3 VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLES

A titre d'information, les concentrations aériennes modélisées peuvent être comparées aux Valeurs Limites d'Exposition Professionnelles françaises (INRS), ou à défaut, américaines (ACGIH), définies pour des durées d'exposition de 15 mn (VLE) ou 8 heures (VME)¹¹. Il convient d'insister sur le caractère purement indicatif de cette comparaison: ce référentiel n'est aucunement adapté à l'évaluation d'une exposition aiguë sur la population générale.

Les valeurs sont reportées dans Tableau 21, avec comme précédemment leur traduction en concentrations de fumées. Le dioxyde de carbone n'est pas pris en compte car ce gaz à effet de serre n'induit pas directement d'effets délétères sur la santé humaine.

Composé	VLEP (mg/m ³)	Type de VLEP	Durée d'exp. (h)	Source	Fraction massique dans les fumées	Concentration de fumées correspondante (mg/m ³)
SO ₂	5	VME	8	INRS	2,18E-03	2 294
SO ₂	10	VLE	0,25	INRS	2,18E-03	4 587
NO ₂	6	VLE	0,25	INRS	4,03E-04	14 888
HF	2,5	VLE	0,25	INRS	1,19E-04	21 008
HCN	2	VME	8	INRS	2,36E-04	8 475
HCN	10	VLE	0,25	INRS	2,36E-04	42 373
HCl	7,5	VLE	0,25	INRS	1,09E-03	6 881
HBr	10	TWA	8	ACGIH	1,60E-05	625 000

Tableau 21 : Valeurs limites d'exposition professionnelles

¹¹ Valeurs indicatives admises dans l'air des locaux professionnels sur une période d'exposition de 8 heures –valeur limite moyenne d'exposition ou VME- ou de 15 minutes –valeur limite d'exposition ou VLE. La VME correspond à la valeur moyenne d'exposition destinée à protéger les travailleurs des effets de type subchronique ; elle correspond à un poste de travail de 8 heures/jour, 5 jours par semaine.

5 EXPLOITATION DES RESULTATS POUR DETERMINER L'IMPACT POTENTIEL SUR LES PERSONNES

Les distances d'effets affichées dans ce chapitre sont à considérer comme des ordres de grandeur.

5.1 POUR LES EFFETS LETAUX ET IRREVERSIBLES

Concernant les effets létaux et irréversibles, les courbes précédentes montrent que la concentration maximale au sol est de l'ordre de 3 600 mg/m³ de fumées, ce qui est en deçà des seuils d'effet pour toutes les durées d'exposition pour lesquelles des seuils d'effets létaux et irréversibles sont disponibles, c'est-à-dire en deçà de 2 heures. De fait, l'incendie n'a pas conduit au dépassement des seuils d'effet létaux et irréversibles et ce quelles que soient les phases de l'incendie considérées.

5.2 EFFETS REVERSIBLES AIGUS (POPULATION GENERALE)

La comparaison des seuils du Tableau 18 avec les concentrations maximales modélisées du Tableau 11 indique:

- une possibilité d'effets réversibles aigus, pour le dioxyde de soufre pendant la deuxième partie de la phase de décroissance du feu, dès les plus faibles durées d'exposition (10 mn), mais uniquement avec la modélisation la plus défavorable des conditions météorologiques. Compte-tenu des hypothèses conservatoires de la modélisation pour le SO₂ (transformation complète du soufre disponible en SO₂), cette possibilité apparaît toutefois très faible;
- une absence d'effets réversibles aigus pour les autres composés.

5.3 EFFETS REVERSIBLES AIGUS (POPULATIONS SENSIBLES)

La comparaison des seuils du Tableau 19 avec les concentrations maximales modélisées du Tableau 12 indique, compte tenu de la variabilité des vents lors de la phase de feu décroissant 2a, une plausibilité d'effets réversibles aigus sur les populations sensibles apparaît pour la phase de feu décroissant 2b (pour tous les composés disposant de VTR: SO₂, NO₂, HCl) et pour la phase de feu couvant (SO₂, NO₂). La distance d'effet potentiel apparaît de l'ordre de 4 km en feu décroissant et 1 km en feu couvant.

5.4 EFFETS REVERSIBLES SUB-AIGUS

La comparaison des VTR du Tableau 20 avec les concentrations maximales modélisées du Tableau 12 indique une plausibilité d'effets réversibles sub-aigus pour les deux substances évaluées, le dioxyde de soufre et le fluorure d'hydrogène (pour des populations sensibles¹²), pendant toutes les phases de feu hormis le feu développé.

5.5 COMPARAISON AUX VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLES

La comparaison des VLEP du Tableau 21 avec les concentrations maximales modélisées du Tableau 12 indique un dépassement potentiel des VLEP pour le dioxyde de soufre pendant la phase de feu décroissant 2b, et une absence de dépassement des VLEP pour les autres composés.

5.6 SYNTHÈSE DES RESULTATS

Dans les tableaux des pages suivantes, sont regroupées, pour chaque produit concerné, les distances où des effets réversibles seraient susceptibles d'être observés en précisant les phases concernées.

Ces distances sont présentées sous 2 formes :

- Une fois par produit,
- Une fois par type d'effet.

Pour mémoire, il est rappelé que les effets irréversibles et létaux n'y sont pas reportés car ils ne sont jamais atteints quelles que soient les phases considérées de l'incendie.

¹² On ne dispose pas d'évaluation de ce type d'effet pour la population générale pour ces substances.

Substance	Concentration correspondante de fumées (mg/m ³)	durée exposition	Effet	Distances d'observation possible des effets (km)		
				Décroissance 2b	Feu couvant 3a	Feu couvant 3b
SO ₂	3 578	10 mn –2 h	Rév. Aigu	(0.5 à 0.6)	-	-
	303	1 j.	Rév. Aigu (sensible)	0.38 à 0.56 ¹³		0.5 à 0.84
	57	1 j.	Rév. Sub Aigu (sensible)	0.75 à 1.5 ¹³		0.9 à 3.4
HF	126	1 j.	Rév. Sub Aigu (sensible)	0.55 à 1 ¹³		0.6 à 1.8
HCl	1 927	1 h	Rév. Aigu (sensible)	0.4 à 1.7	-	-
NO ₂	1 166	1 h	Rév. Aigu (sensible)	0.35 à 2.3	-	0.1 à 0.3
	496	1 h		0.3 à 4.6	0.4	0.54

- : seuils non atteints

Tableau 22 : Synthèse des différentes distances d'effet calculées, par substances

¹³ La phase de feu décroissant 2b dure moins de 24h. Aussi convient-il de considérer le cumul des expositions sur cette phase et dans la suivante.

Substance	Concentration correspondante de fumées (mg/m ³)	durée exposition (min)	Effet	Distances d'observation possible des effets (km)		
				Décroissance 2b	Feu couvant 3a	Feu couvant 3b
SO ₂	3 578	10 mn –2 h	Rév. Aigu	(0.5 à 0.6)	-	-
NO ₂	496	1 h	Rév. Aigu (sensible)	0.3 à 4.6	0.4	0.54
NO ₂	1 166	1 h	Rév. Aigu (sensible)	0.35 à 2.3	-	0.1 à 0.3
HCl	1 927	1 h	Rév. Aigu (sensible)	0.4 à 1.7	-	-
SO ₂	303	1 j.	Rév. Aigu (sensible)	0.38 à 0.56 ¹³		0.5 à 0.84
SO ₂	57	1 j.	Rév. Sub Aigu (sensible)	0.75 à 1.5 ¹³		0.9 à 3.4
HF	126	1 j.	Rév. Sub Aigu (sensible)	0.55 à 1 ¹³		0.6 à 1.8

- : seuils non atteints

Tableau 23 : Synthèse des différentes distances d'effet calculées, par types d'effets

6 RÉFÉRENCES CITÉES

(Cf. Autres références en Annexe 1)

ATSDR. Minimal risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls.html>

INRS. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents physiques en France. <http://www.inrs.fr>

OEHHA - Office of Environmental Health Hazard Assessment, Agency Oakland California, draft, february 2000. <http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/index.asp>

OMS : Valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO Air quality guidelines, Geneva, 1999)

7 SYNTHÈSE

A partir des données transmises par SBM Formulation, une estimation des concentrations en fumées au niveau du sol a été réalisée par l'INERIS.

Cette estimation a été réalisée en utilisant des outils développés plus particulièrement pour déterminer des distances d'effet dans le cadre d'une étude des dangers. Ceci suppose notamment que des hypothèses majorantes ont été réalisées en particulier :

- sur la combustion totale des produits présents dans le stockage,
- sur le taux de conversion des produits halogénés lors de la combustion,
- ou encore sur le fait que seule la concentration sur l'axe du panache n'ait été considérée.

En se basant sur les seuils existants, il s'avère que ceux associés à des effets irréversibles ou létaux n'ont jamais été observés au niveau du sol pour moins de 2 heures d'exposition.

En revanche, les seuils associés à des effets réversibles ont pu avoir été dépassés, notamment pour les populations sensibles, jusqu'à une distance d'environ 3,4 km du foyer. Le secteur angulaire à considérer prioritairement est compris entre un angle de 260 et 310°.

Ces éléments corroborent pour partie les données de l'enquête sanitaire mise en œuvre par la CIRE, qui a rapporté des cas d'effets réversibles.

8 LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Modélisation des effets toxiques de l'incendie d'un stockage de produits finis	5 A4
Annexe 2	Observations de terrain recueillies par l'INERIS sur la dispersion des fumées	2 A4

ANNEXE 1

MODELISATION DES EFFETS TOXIQUES DE L'INCENDIE D'UN STOCKAGE DE PRODUITS FINIS

Pour évaluer les distances sous le vent d'un incendie en deçà desquelles des effets sur la santé humaine, liés à la toxicité des fumées, pourraient être ressentis, une démarche en quatre étapes est appliquée. Elle est présentée ci-après :

- Caractérisation de la source d'émission des polluants toxiques, c'est-à-dire, entre autres, hauteur, vitesse et température d'émission des fumées rejetées à l'atmosphère ;
- Calcul de la dispersion atmosphérique et notamment des niveaux maximums de concentration en gaz toxiques au niveau du sol ;
- Caractérisation de la toxicité des fumées d'incendie au moyen de seuils critiques correspondant à l'apparition d'un effet donné sur la santé humaine ;
- Comparaison des niveaux maximum calculés avec les seuils de toxicité déterminés en première étape.

Les 2 premières étapes ont été réalisées au moyen du code de calcul DISFUM, développé à l'INERIS dont les principales caractéristiques sont rappelées ci-après.

Un incendie constitue une source d'émission de gaz toxiques assez particulière du fait :

- De la diversité des gaz émis ;
- De leur température ;
- Et du mouvement ascensionnel général qui résulte de la poussée d'Archimède.

1 Le terme source

En conséquence, en préalable à tout calcul de dispersion de fumées d'incendie, il est nécessaire de :

- quantifier leur énergie thermo-cinétique initiale ;
- déterminer les concentrations des gaz toxiques en tenant compte de la dilution induite par l'air en excès entraîné par l'incendie.

1.1 - Détermination de l'énergie thermo-cinétique des fumées

S'agissant des incendies tels que ceux considérés dans le cadre de cette étude, les fumées sont émises en partie supérieure du volume formé par les flammes. La première étape pour caractériser l'émission consiste à déterminer la hauteur des flammes qui correspond en fait à la hauteur d'émission des fumées. Pour ce faire, il existe de nombreuses formules empiriques publiées dans la littérature. On retient la formule proposée par Heskestad [Heskestad, 1984] pour cette étude. La hauteur h obtenue à partir de la relation proposée par Heskestad correspond à la hauteur moyenne des flammes car en réalité ces dernières sont animées d'un mouvement intermittent.

Dans le cas de feux d'hydrocarbures liquides, Heskestad a montré qu'à la hauteur h , l'écart moyen de température entre les fumées de l'incendie et l'air ambiant est proche de 250 K [Heskestad, 1984 et 1986]. Par ailleurs, ce même auteur fournit une corrélation empirique donnant la vitesse moyenne d'élévation des fumées toujours à la hauteur h en fonction de la quantité de chaleur convectée par les fumées. S'agissant de cette dernière variable, des mesures expérimentales montrent qu'au moins 60 % de la puissance thermique développée par un incendie est convectée.

Dans le cas des incendies considérés dans cette étude, les matériaux constituant l'aliment au feu sont différents des hydrocarbures liquides. Toutefois, à défaut d'autre modèle plus adapté, on retient celui proposé par Heskestad.

La puissance thermique est calculée à partir de l'énergie de combustion des produits, qui elle-même dépend :

- de la masse de produits qui brûle (prise égale à 100 % de la masse initialement stockée dans la cellule, hors inertes) ;
- du rendement moyen de combustion (pris égal à 90 %) ;
- du pouvoir calorifique (inférieur) moyen de ces produits ;
- de la vitesse de combustion moyenne de ces produits.

1.2. - Détermination de la dilution des gaz toxiques par l'air entraîné

Toujours sur la base des travaux de Heskestad, il apparaît que la quantité totale d'effluents gazeux entraînée par un incendie peut être reliée à la puissance thermique convectée par les fumées [Heskestad, 1984].

A proximité du foyer, la diffusion des polluants ne dépend a priori que de peu des caractéristiques de l'écoulement atmosphérique (vent). La dispersion est contrôlée par la convection naturelle ascendante des fumées chaudes. Ces dernières sont émises à l'atmosphère à une température plus élevée que l'ambiante et avec une énergie cinétique à prendre en compte.

Par ailleurs, ces fumées sont composées d'une part des produits de combustion proprement dits et d'autre part de produits, dits passifs, qui n'ont pas participé directement à la combustion.

Des mesures effectuées au cours d'expérimentations [Davidson, 1990] indiquent que la quantité d'air entraînée dans un incendie librement ventilé correspond à 5 à 12 fois la quantité d'air utile à la réaction de combustion. Les gaz toxiques, produits par la combustion, sont donc, à la source, déjà dilués par les gaz passifs tels que l'air en excès.

Il est par ailleurs nécessaire de préciser que seuls les toxiques gazeux majeurs seront retenus dans les calculs de dispersion. Les constituants secondaires des fumées (suies, gouttelettes, composés toxiques mineurs, produits sublimés, ...) ne sont pas pris en compte dans l'étude de dispersion atmosphérique.

Pour obtenir des informations plus précises sur les phénomènes entrant en jeu dans la détermination du terme source d'un incendie, le lecteur pourra se référer au référentiel « Dispersion atmosphérique de fumées toxiques » disponible sur le site internet de l'INERIS.

2 - Calculs de la dispersion atmosphérique des fumées toxiques

La dispersion des fumées dans l'atmosphère dépend essentiellement :

- des caractéristiques d'émission ;
- des conditions météorologiques, en particulier la turbulence de l'atmosphère et la vitesse du vent.

Ces points sont présentés plus précisément dans le référentiel « dispersion » disponible sur le site internet de l'INERIS.

Pour calculer la dispersion des panaches de fumées, l'approche suivante est retenue :

- calcul de la trajectoire de l'axe des panaches considérés ;
- calcul des concentrations en gaz autour de cet axe, en supposant une distribution gaussienne.

Pour le calcul de la trajectoire, la corrélation de Briggs [Briggs, 1969] a été adoptée. Suivant les conditions de stabilité, elle permet de calculer les hauteurs du panache en fonction de la hauteur d'émission, de la poussée initiale, de la vitesse du vent et de la distance de la source.

Cette corrélation donne les variations suivantes :

- plus la poussée est importante, plus le panache sera élevé ;
- plus la distance par rapport à la source est importante, plus le panache sera élevé, à moins que son niveau de dilution soit tel qu'il devienne passif et poursuive alors sa dispersion à altitude constante ;
- plus la vitesse du vent est importante, moins le panache sera élevé, il sera couché plus rapidement.

Il est clair également, que plus la hauteur initiale d'émission des fumées est importante, plus le panache se trouvera à une altitude élevée.

Par ailleurs, la distribution des concentrations autour de la trajectoire de l'axe du panache est supposée gaussienne. Cela signifie, que la concentration sera plus forte au centre du panache qu'en périphérie, comme le montre la Figure 8.

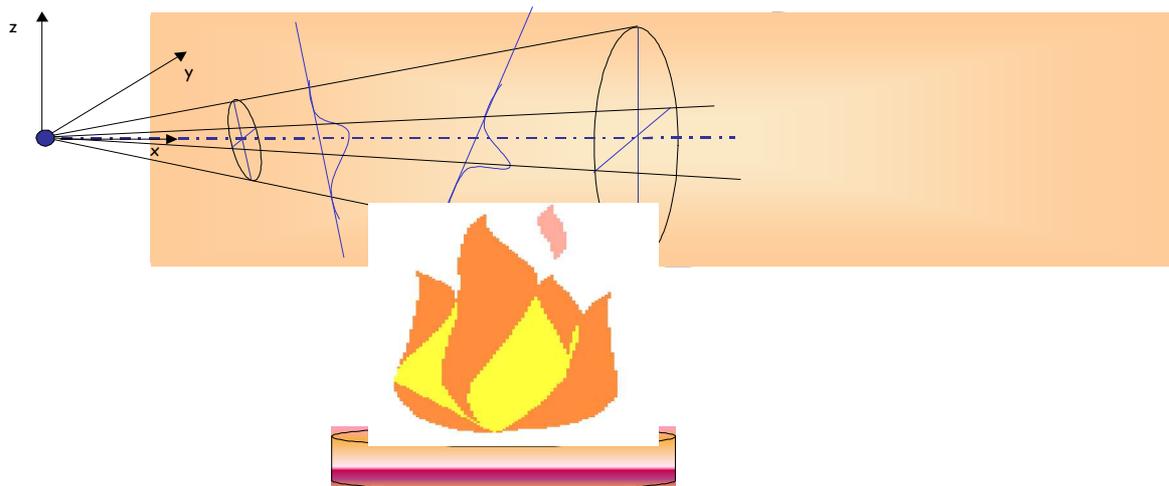


Figure 8 : Distribution gaussienne des concentrations au sein d'un panache

La concentration est une fonction de la distance sous le vent, comptée depuis le point d'émission, distance qui est prise en compte par des paramètres déterminés empiriquement et corrigés par la valeur de la rugosité locale. Quand la distance augmente, les concentrations au centre du panache diminuent globalement. De plus, la concentration est proportionnelle au débit massique, mais inversement proportionnelle à la vitesse du vent.

Ensuite, les vitesses de vent considérées sont supposées constantes sur toute la hauteur de la dispersion atmosphérique. D'autres modèles proposent une variation logarithmique du profil des vitesses du vent.

Plusieurs remarques importantes concernant l'expression employée pour le calcul de concentration en gaz au sol sont à formuler :

- Les phénomènes de réflexion
- La prise en compte d'une couche d'inversion

En premier lieu, cette expression prend en compte les phénomènes de réflexion au sol et les valeurs de concentrations calculées sont doubles de celles qui seraient obtenues en négligeant les réflexions ou s'il était admis que les gaz ne sont pas réfléchis mais absorbés par le sol.

En second lieu, Il reste à fixer l'altitude Z où une couche d'inversion de températures serait susceptible d'être observée. Le choix de ce paramètre est particulièrement important car le modèle de dispersion utilisé ensuite suppose qu'une couche d'inversion est « infranchissable » par le panache de fumées.

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

Toutefois, compte tenu de l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées, dans le champ proche (typiquement les 100 premiers mètres), il est clair que malgré une 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, 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, doit être calculée.

Pour ce faire, on retient les corrélations proposées par Briggs [Briggs, 1969] qui permettent de calculer l'altitude de culmination Δh d'un panache se dispersant dans une atmosphère très stable. Or une couche d'inversion de température est justement une zone de forte stabilité atmosphérique. Finalement, l'altitude Δh a été retenue comme correspondant à une bonne estimation de Z_c .

Cette expression permet de quantifier l'influence de la présence d'une couche d'inversion car :

- dans ses calculs, la valeur de l'altitude de l'axe du panache est limitée à l'altitude critique Z_c des couches d'inversion définies précédemment. Les concentrations calculées au sol sont d'autant plus importantes que l'altitude de l'axe du panache est limitée ;
- de plus, la présence d'une couche d'inversion conduit, en altitude, à des phénomènes de réflexion qui peuvent être considérés analogues à ceux observés au sol en première approximation. Le cas échéant, les phénomènes de réflexion en altitude ont été pris en compte au cours des calculs.

RÉFÉRENCES

G. A. BRIGGS,

« Plume Rise », U.S. Atomic Energy Commission, Office of information Services, 1969

CERCHAR, 1989. Evaluation expérimentale en grandeur d'un incendie de produits phytosanitaires. Client privé. INC-CCw/JLe 8ç-(2)-98 42-2830. 28 avril 1989.

C. CHIVAS,

« Dispersion de fumées toxiques », INERIS 2005

J. C. COUILLET,

« Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) : Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul », INERIS 2002

G.A. DAVIDSON,

« A modified power law representation of the Pasquill Gifford dispersion coefficients », Air and Waste Management, vol. 40, 8, 1990

G. HESKESTAD,

« Engineering Relations for Fire Plumes », Factory Mutual Research Corporation, Fire safety Journal, 7, 1984, pp 25-32

G. HESKESTAD,

« Fire Plume Air Entrainment according to two Competing Assumptions », Factory Mutual Research Corporation, 21th Symposium on Combustion/ the Combustion Institute, 1986/ pp 111-120

ANNEXE 2

OBSERVATIONS DE TERRAIN RECUEILLIES PAR L'INERIS SUR LA DISPERSION DES FUMÉES

Capitaine des Pompiers (18.07.2005 et 14.10.2005):

Le Capitaine des Pompiers a fait part des observations suivantes:

- Du début de l'incendie jusqu'au lever du jour, le panache de fumée montait très haut dans le ciel, sous l'effet de la chaleur. Haut dans le ciel, le panache se décalait alors vers l'Ouest, où il semblait redescendre lentement au loin (effet du refroidissement) en se dispersant. Au niveau du sol, il y avait un peu de vent, régulier de secteur Est.
- Au lever du jour (8h), le vent est devenu faible et instable avec une dominante vers l'Est. Le feu était déjà moins fort, et les fumées s'épandaient au niveau du sol sur le site.
- Toute la journée, le vent est resté instable, orienté du Sud-Est au Nord-Est. Alors que le feu était réduit à de petits foyers (après-midi), les fumées (devenues blanches mais toujours irritantes) stagnaient sur le site, avec un vent souvent nul. Une photographie prise dans l'après-midi montre le panache allant vers le Nord-Est. ce qui illustre l'instabilité du vent. Le panache dans l'après midi n'était pas notablement plus orienté vers le Nord-Ouest que vers d'autres directions¹⁴.
- Dès le lendemain (28.06.2005), le vent s'est établi au Nord-Ouest pour ne pratiquement plus bouger ensuite.

Habitante et exploitante agricole à 2 km au Sud-Ouest du site (19.10.2005):

La personne résidant à proximité immédiate du point de prélèvement INERIS S13¹⁵ a travaillé en extérieur dès 5h du matin le 27.06.2005. Elle a alors remarqué des odeurs de produit phyto-sanitaire, qu'elle a attribué à de possibles traitements dans les environs.

Entre 5h et 8h30, la personne a remarqué le nuage au Nord-Est, qu'elle a attribué à un quelconque brûlage.

Vers 8h30, l'odeur est devenue extrêmement forte, et l'apparition d'un hélicoptère au niveau de SBM lui a fait comprendre la nature de l'incendie. La personne est retournée fermer les portes et fenêtres de sa maison. En ressortant (vers le Nord), la personne a remarqué la densité du nuage de fumées au niveau du sol: les arbres à 200 m se trouvaient occultés.

¹⁴ Contrairement à ce que peut suggérer le relevé des vents par MétéoFrance sur le site de Vias entre 13 h et 20 h. Le relevé sur la station de Corneilhan n'indique pas une tendance aussi nette.

¹⁵ cf. Rapport d'étude INERIS-DRC-05-71165/DESP-R01a.

La personne décrit la situation des fumées à 10h comme "un enfer" même à l'intérieur de la maison. Elle signale que son fils de 21 ans, parti travailler dans les champs vers 11h, y a été pris de vomissements.

Par la suite (dans l'après-midi, non précisé), le nuage de fumées s'est décalé vers l'Ouest.

Autres sources:

Outre des confirmations sur certains des points précédents, diverses observations ont en outre été rapportées par la DRIRE, SBM Formulation, ou d'autres parties prenantes présentes au CLIC du 19.10.2005:

- Panache principal au Sud-Ouest avant extinction de l'incendie, à l'Est pendant la phase de feu couvant;
- Panache montant haut dans le ciel jusque 8h-8h30, "écroulement" du panache vers 8h-8h30;
- Fumées importantes dans la zone d'activité le 27.06.05 notamment au moment de l'arrivée du personnel le matin, en extérieur et en extérieur;
- Détection d'odeurs à grande distance à l'Ouest (jusque Carcassonne à 70 km).
