



**GUIDE TECHNIQUE RELATIF AUX
VALEURS DE REFERENCE
DE SEUILS D'EFFETS
DES PHENOMENES ACCIDENTELS
DES INSTALLATIONS CLASSEES**

VERSION OCTOBRE 2004

INTRODUCTION

Le présent guide présente les valeurs de référence des seuils d'effets toxiques, de surpression thermiques, et liés à l'impact d'un projectile pour les installations classées.

Pour chaque type d'effets, les valeurs couramment utilisées au niveau national et international ainsi que les principales données référencées dans la littérature sont introduites à titre d'information. Ces listes de valeurs ne se veulent pas exhaustives.

En référence à l'arrêté relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées du 22 octobre 2004, les valeurs réglementaires sont présentées. Ces valeurs sont notamment à prendre en compte notamment pour la détermination des zones d'effets d'accident potentiel dans les études de dangers.

GLOSSAIRE

AEGL = Acute Exposure Guideline Levels.

CL x% = Concentration létale supposée provoquer la mort de x% de la population générale exposée pendant un temps d'exposition donné.

Effets missiles = effets liés à l'impact d'un projectile.

ERPG = Emergency Response Planning Guidelines.

Effets domino = action d'un phénomène accidentel affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un phénomène accidentel sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des conséquences.

Guide MU 90 = guide relatif à la maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque publié en 1990 par le ministère en charge de l'environnement.

IDLH = Immediately Dangerous to Life or Health.

INERIS = Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques.

MEDD = Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Valeurs relatives aux seuils d'effets toxiques

RESUME :

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

Seuils d'effets toxiques pour l'homme par inhalation			
	<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Concentration d'exposition</i>	<i>Référence</i>
Exposition de 1 à 60 minutes	Létaux	SEL (CL 5%) SEL (CL 1%)	Courbes de Toxicité aiguë par inhalation –Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement– 1998 Seuils de toxicité aiguë – Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère – Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques - 2003
	Irréversibles	SEI	
	Réversibles	SER	

*Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils de toxicité aiguë
(SEL : Seuil des Effets Létaux ; SEI : Seuil des Effets Irréversibles ;
SER : Seuils des Effets Réversibles ; CL = Concentration Létale)*

Pour la délimitation des zones d'effets significatifs sur la vie humaine, les seuils d'effets de référence pour les installations classées figurant sur la liste prévue au IV de l'article L.515-8 du code de l'environnement sont les suivants:

- les seuils des effets irréversibles SEI pour la zone des dangers significatifs pour la vie humaine;
- les seuils des premiers effets létaux (SEL) correspondant à une CL 1% pour la zone des dangers graves pour la vie humaine ;
- les seuils des effets létaux (SEL) significatifs correspondant à une CL 5 % pour la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

En l'absence de donnée, d'autres valeurs peuvent être employées sous réserve de justification de l'exploitant ou d'un tiers expert.

I. Comparatif international

Hors Europe :

Des seuils d'effets toxiques relatifs aux substances chimiques dangereuses sont développés au niveau international. Parmi ces valeurs, on peut citer par exemple les valeurs AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) ou IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health). Ces données sont surtout destinées à l'élaboration de plans de secours et à la gestion des situations d'urgence.

Les définitions de ces seuils et les méthodologies de détermination associées à ces valeurs ne sont pas adaptées aux usages nationaux français, compte tenu notamment des facteurs de sécurité utilisés et des confusions possibles entre les effets sur la santé pris en compte pour définir ces seuils.

En Europe :

A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodologie européenne de détermination des seuils de toxicité aiguë des substances dangereuses. Aussi, certains pays utilisent les valeurs internationales existantes ; d'autres, comme la France par exemple, ont développé leur propre méthodologie.

Le tableau ci-après présente les valeurs de référence des seuils d'effets toxiques utilisées dans certains Etats membres pour définir les zones devant faire l'objet de mesures de gestion de risques (règles d'urbanisme et de construction, plans de secours externes,...). Ces données sont issues des travaux européens menées par le Joint Research Center à Ispra dans le cadre du groupe de travail Land Use Planning (LUP) (à noter que la justification du choix des valeurs utilisées n'est pas donnée par les Etats membres concernés).

Pays	Effets toxiques
Autriche	IDLH
Belgique	ERPG-3
France	Seuils des Effets Létaux (SEL) Seuils des Effets Irréversibles (SEI)
Allemagne	ERPG 2 + zone forfaitaire pour certaines substances
Italie Zone de forte létalité	LC50
Zone de première létalité	-
Zone des effets irréversibles	IDLH
Zone des effets réversibles	-
Portugal	AEGL ou ERPG recommandés

Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils de toxicité aiguë utilisées en Europe pour la gestion des risques

Les définitions de l'IDLH sont les suivantes :

IDLH (immediately dangerous to life or health – valeur de 1987 ou 1994) :

IDLH is an acronym for Immediately Dangerous to Life or Health. This refers to a concentration, formally specified by a regulatory value, and defined as the maximum exposure concentration of a given chemical in the workplace from which one could escape within 30 minutes without any escape-impairing symptoms or any irreversible health effects. This value is normally referred to in respirator selection.

Les définitions (en anglais) de E.R.P.G-1, E.R.P.G-2, et E.R.P.G-3. sont les suivantes :

- The **E.R.P.G-1** is the maximum airborne concentration below which it is believed nearly all individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing other than mild transient adverse health effects or perceiving a clearly defined objectionable odor.
- The **E.R.P.G-2** is the maximum airborne concentration below which it is believed nearly all individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing or developing irreversible or other serious health effects or symptoms that could impair their abilities to take protective actions.
- The **E.R.P.G-3** is the maximum airborne concentration below which it is believed nearly all individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing or developing life-threatening health effects.

Les définitions des valeurs A.E.G.Ls (en anglais) sont les suivantes:

- **A.E.G.L-1** : airborne concentration of a substance at or above which it is predicted that the general population, including "susceptible" but excluding "hypersusceptible" individuals, could experience notable discomfort. Airborne concentrations below A.E.G.L-1 represent exposure levels that could produce mild odor, taste, or other sensory irritation.
- **A.E.G.L-2** : airborne concentration of a substance at or above which it is predicted that the general population, including "susceptible" but excluding "hypersusceptible" individuals, could experience irreversible or other serious, long-lasting effects or impaired ability to escape. Airborne concentrations below A.E.G.L-2 but at or above A.E.G.L-1 represent exposure levels that may cause notable discomfort.
- **A.E.G.L-3** : airborne concentration of a substance at or above which it is predicted that the general population, including "susceptible" but excluding "hypersusceptible" individuals, could experience life-threatening effects or death. Airborne concentrations below A.E.G.L-3 but at or above A.E.G.L-2 represent exposure levels that may cause irreversible or other serious, long-lasting effects or impaired ability to escape.

Situation française antérieure:

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus et dans un souci d'harmonisation des valeurs retenues, le ministère en charge de l'environnement a décidé dans les années 90 de développer une méthodologie et des valeurs de seuils de toxicité aiguë nationales (SEL et SEI) définies au paragraphe II.

Le ministère de l'écologie et du développement durable (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques), en collaboration avec le ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées (Direction Générale de la Santé), a demandé à l'INERIS de déterminer, sur la base d'une méthodologie, les seuils de toxicité aiguë (seuils d'effets létaux, irréversibles et réversibles et seuils de perception) de certaines substances dangereuses en retenant en priorité les substances les plus couramment examinées dans les études de dangers.

Cette méthodologie, intitulée « méthodologie de détermination des seuils des effets létaux, des effets irréversibles, des effets réversibles et de perception du 20/11/2003 » est disponible sur le site internet de l'INERIS et du MEDD.

II. Valeurs de référence pour les installations classées

II.1. Seuils d'effets toxiques de référence

Dans le cas d'établissements stockant, employant ou produisant des substances toxiques, et à partir des scénarios d'accidents retenus dans les études de dangers, l'exploitant définit des zones d'effets toxiques potentiels correspondant aux premiers décès, aux effets létaux significatifs (significativité fixée à 5 %) et aux premières atteintes irréversibles sur l'homme.

Une méthodologie de détermination des seuils de toxicité aiguë a été développée au niveau national et permet de fixer les seuils de toxicité aiguë en cas d'émission accidentelle d'une substance toxique dans l'atmosphère par un site industriel. Publiée le 02 mai 2001, elle a fait l'objet d'une révision et a été adoptée le 20 novembre 2003 par le groupe d'experts toxicologues nommés par le ministère de l'écologie et du développement durable. Cette méthodologie est disponible dans le guide technique intitulé « Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère - Seuils de toxicité aiguë. Ministère de l'écologie et du développement durable – INERIS » publié en 2003 ainsi que sur le site internet de l'INERIS (<http://www.ineris.fr>).

Quatre niveaux de seuils de toxicité permettent d'encadrer les effets potentiels d'une situation accidentelle, l'exposition étant considérée comme unique, par voie respiratoire et de courte durée (de 1, 3, 10, 20, 30, et 60 minutes et 8 heures). Pour des expositions inférieures à la minute, les seuils définis pour 1 minute d'exposition sont utilisés par défaut.

Les couples concentration - durée d'exposition associés à ces effets permettent de déterminer les seuils de toxicité aiguë dont les définitions ont été actées le 20 août 2003 et reprises dans la méthodologie révisée du 20 novembre 2003. Ces définitions sont les suivantes :

- le "seuil des effets létaux" (S.E.L) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle on peut observer une mortalité au sein de la population exposée.
- le "seuil des effets irréversibles" (S.E.I) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle des effets irréversibles peuvent apparaître au sein de la population exposée.
- le "seuil des effets réversibles" (S.E.R) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle la population exposée peut présenter des effets réversibles.
- le "seuil de perception" (S.P) correspond à la concentration entraînant la détection sensorielle de la substance chimique par la population exposée.

Les seuils des effets létaux (SEL) et des effets irréversibles (SEI) développés dans le cadre de la méthodologie française sont les valeurs de référence pour le calcul des zones d'effets d'une émission accidentelle de substances dangereuses dans les études de dangers des installations classées. Ces valeurs expriment la toxicité aiguë pour une période d'exposition de 1, 3, 10, 20, 30, et 60 minutes : ce sont les seuils des effets létaux (SEL) et les seuils des effets irréversibles (SEI).

A titre de la présente réglementation, les seuils des effets réversibles (SER) et les seuils de perception (SP) ne sont pas des valeurs utilisées pour la détermination des zones d'effets d'une émission accidentelle de substances dangereuses. Ces deux types de valeurs peuvent être pris en compte, dans le cadre de situation d'urgence, pour déclencher des actions d'alerte ou de secours par les industriels et les pouvoirs publics.

Pour les substances dangereuses ayant fait l'objet d'une détermination au niveau français de seuils de toxicité aiguë, les valeurs de référence sont disponibles au sein du guide technique intitulé « Courbes de toxicité aiguë par inhalation – Fiches techniques. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement » publié en 1998 et du guide technique intitulé « Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère - Seuils de toxicité aiguë. Ministère de l'écologie et du développement durable – INERIS » publié en 2003. Les données présentées dans le guide technique de 2003 sont disponibles sur le site internet de l'INERIS (<http://www.ineris.fr>).

Le guide technique de 2003 correspond à une révision de guide technique de 1998. Aussi, les valeurs présentées dans le guide technique de 2003 se substituent à celles déjà disponibles pour une substance donnée dans le guide technique de 1998.

Les valeurs de référence sont présentées dans le tableau récapitulatif ci-dessous.

Seuils d'effets toxiques pour l'homme par inhalation			
	<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Concentration d'exposition</i>	<i>Référence</i>
Exposition de 1 à 60 minutes	Létaux	SEL (CL 5%) SEL (CL 1%)	Courbes de Toxicité aiguë par inhalation – Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement– 1998
	Irréversibles	SEI	
	Réversibles	SER	Seuils de toxicité aiguë – Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère – Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable-Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques - 2003

*Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils de toxicité aiguë
(SEL : Seuil des Effets Létaux ; SEI : Seuil des Effets Irréversibles ;
SER : Seuils des Effets Réversibles ; CL = Concentration Létale)*

➤ **Lorsque des valeurs de référence ne sont pas disponibles :**

En l'absence de valeurs de référence nationales, toute proposition basée sur des valeurs publiées par des organismes reconnus doit être fondée et justifiée par l'exploitant ou le tiers expert. Toute proposition est donc spécifique à la substance examinée.

➤ **Cas des mélanges de substances :**

Les seuils d'effets développés au niveau français le sont pour des substances pures. Dans certaines conditions accidentelles, des mélanges de substances toxiques peuvent être émis dans l'atmosphère.

On peut distinguer quatre types d'interactions entre des substances en mélange :

- aucune interaction ;
- antagonie ;
- synergie ;

- additivité.

Compte tenu de l'insuffisance des connaissances scientifiques sur la toxicité des mélanges, la règle d'additivité suivante peut être appliquée, par défaut, pour évaluer la toxicité de ces derniers lorsque les composés en mélange présentent les mêmes types d'effets toxiques (par exemple effets irritants sur les voies aériennes supérieures). L'application de cette méthode est donc spécifique et son utilisation doit être fondée et justifiée par l'exploitant ou le tiers expert.

La méthode proposée est issue du document ISO/DIS 13344 intitulé « estimation of the lethal toxic potency of fire effluents ».

« Dans le cas de produits dilués ou comportant plusieurs substances toxiques (fumées d'incendie par exemple), 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 avec une concentration X_i exprimée en pourcentage du volume ou du poids suivant l'unité dans laquelle est exprimée le $Seuil_i$ ($\sum X_i = 100$) et ayant respectivement un seuil $Seuil_i$, un seuil « équivalent » peut être estimé au moyen de la relation suivante :

$$Seuil_{eq} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{Seuil_i}}$$

Le seuil « équivalent » ainsi déterminé n'est valable que pour la durée d'exposition correspondant au seuil de chacun des composants. Cette durée d'exposition doit être identique pour tous les composants. Ce calcul est à effectuer pour plusieurs durées d'exposition pour définir une nouvelle loi de type $C^n \cdot t = E$ (avec $C =$ concentration et $E =$ Exposition), en calculant notamment un nouvel exposant n pour le mélange si la courbe $LogC-Logt$ est une droite. Dans le cas contraire, il est nécessaire de calculer le seuil équivalent pour les durées d'exposition considérées.

Valeurs relatives aux seuils d'effets de surpression

RESUME :

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

- pour les effets sur les structures :
 - 20 hPa ou mbar, seuil des destructions significatives de vitres¹;
 - 50 hPa ou mbar, seuil des dégâts légers sur les structures;
 - 140 hPa ou mbar, seuil des dégâts graves sur les structures;
 - 200 hPa ou mbar, seuil des effets domino;
 - 300 hPa ou mbar, seuil des dégâts très graves sur les structures.

 - pour les effets sur l'homme :
 - 20 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme¹ ;
 - 50 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
 - 140 hPa ou mbar, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine;
 - 200 hPa ou mbar, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.
-

¹ Compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à 2 fois la distance d'effet obtenue pour une surpression de 50 mbar.

I. Généralités sur les effets de surpression aérienne

La « surpression aérienne » considérée est la conséquence d'une explosion qui se manifeste par la propagation depuis la zone de l'explosion d'une onde de pression dans l'atmosphère à une vitesse de l'ordre de celle des ondes acoustiques (340 m/s dans l'air à 15°C). Lorsqu'on mesure, en un point fixe de l'espace, les caractéristiques d'une telle onde, on observe une impulsion positive de pression (surpression) dont la durée se mesure en général en millisecondes suivie d'une phase de dépression.

Si l'explosion a pour origine la détonation d'une substance explosive, la surpression positive se caractérise par une très brusque montée (quasi-instantanée) jusqu'au maximum de pression suivie d'une décroissance quasi-linéaire. Le pic de pression négative est beaucoup moins important. Il n'est en général pas considéré dans l'évaluation des effets d'une onde de pression.

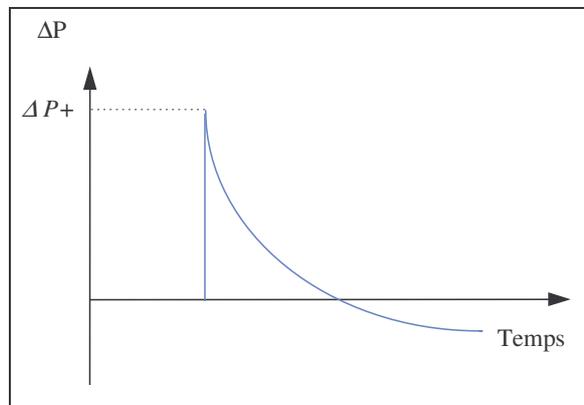


Figure relative à l'onde de pression dite « onde de choc »

En revanche, si l'explosion est une déflagration d'un nuage explosif de violence modérée (vitesse de flamme plus petite que 120 m/s), les taux de croissance et de décroissance de la surpression de l'impulsion positive sont du même ordre. La phase négative est en théorie presque une homothétie inversée de la phase positive (Lannoy, 1984). La présence d'obstacle peut changer significativement cette conclusion.

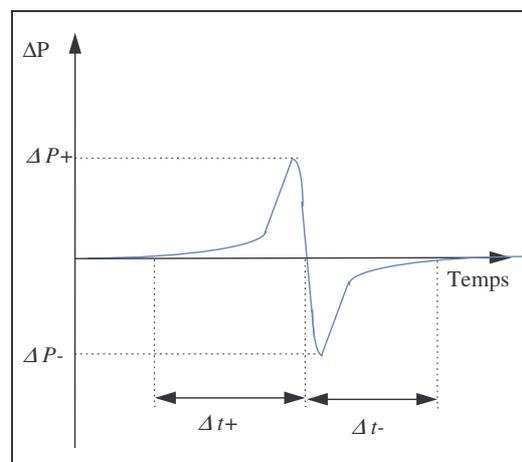


Figure relative à une onde de pression engendrée au droit d'une déflagration à vitesse de flamme modérée

La pression est une force par unité de surface susceptible d'induire des efforts de flexion ou de cisaillement dans les structures, éventuellement de compression pour le corps humain. Une onde de pression peut également propulser des projectiles.

II. Comparatif des valeurs utilisées en Europe, en France et dans la littérature internationale

Les valeurs relatives aux seuils d'effets de surpression et disponibles actuellement sont associées à la détonation d'explosifs condensés pour laquelle la phase positive est relativement courte (quelques millisecondes) et la phase négative très peu prononcée.

Il n'est pas évident que ces seuils soient identiques pour la situation plus classique des déflagrations et peu d'informations sont disponibles sur ce point puisque les simulations d'accidents mettant en scène des déflagrations sont généralement faites sur la base d'un « équivalent TNT ». Comme la durée des impulsions est très généralement bien plus grande et la phase négative nettement plus prononcée, on peut imaginer des situations où la déflagration produirait, pour un niveau moindre de surpression par rapport à celui d'une détonation, des effets d'un niveau de dégâts équivalent. Cela pourrait se produire par exemple si la fréquence caractéristique de l'onde est compatible avec un mode de vibration de la structure permettant l'apparition d'une résonance ou si l'effet de l'onde de détente (phase négative) se conjugue sur une même structure avec celui de l'onde de surpression.

En Europe :

Le tableau ci-après présente les valeurs de référence des seuils d'effets de surpression utilisées dans certains États membres pour définir les zones devant faire l'objet de mesures de gestion de risques (règles d'urbanisme et de construction, plans de secours externes,...). Ces données sont issues des travaux européens menées par le Joint Research Center à Ispra dans le cadre du groupe de travail Land Use Planning (LUP) (à noter que la justification du choix des valeurs utilisées n'est pas donnée par les États membres concernés).

Pays	Effets de surpression
Autriche Maîtrise de l'urbanisation Effets domino	25 mbar 100 mbar
Belgique	140 mbar
France	Seuil des effets létaux : 140 mbar Seuil des effets irréversibles : 50 mbar
Allemagne	100 mbar 30 mbar
Italie Zone de forte létalité Zone de première létalité Zone des effets irréversibles Zone des effets réversibles	600 mbar 140 mbar 70 mbar 30 mbar
Royaume-Uni	Zone restreinte (Inner zone) 600 mbar Zone moyenne (Middle zone) 140 mbar Zone large (Outer Zone) 70 mbar

Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets de surpression utilisées en Europe pour la gestion des risques

Situation française antérieure :

La réglementation pyrotechnique (notamment l'arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques, JORF 1988, n°1196) prescrit des seuils de référence pour les hommes et les structures. Les seuils pour la protection des personnes fournis dans la réglementation pyrotechnique intègrent les effets indirects correspondant à des dégâts aux structures environnantes (écroulement de structures, projections,...).

Ces données sont présentées dans le tableau ci-après :

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Dommages aux personnes	50 % de létalité potentielle	Blessures graves pouvant être mortelles	Blessures	Possibilité de blessures	Très faible possibilité de blessures légères
Dommages aux biens	Dégâts très graves	Dégâts importants	Dégâts moyens et légers	Dégâts légers	Dégâts très légers
Seuils en mbar	600	300	100	50	

Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets de surpression de l'arrêté ministériel du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques

Pour les installations classées autres que pyrotechniques, le guide de la Maîtrise de l'Urbanisation édité par le ministère en charge de l'environnement en 1990, préconise les seuils d'effets de surpression pour l'homme suivants :

- le seuil 140 mbar qui exprime l'apparition d'effets létaux (par effets indirects) ;

- le seuil 50 mbar qui exprime l'apparition des effets irréversibles (blessures légères et dégâts légers).

L'instruction technique jointe à la circulaire du 9 novembre 1989 relative aux dépôts anciens de liquides inflammables retient les seuils suivants pour déterminer les distances d'éloignement par rapport aux installations visées :

- le seuil 170 mbar ;
- le seuil 50 mbar.

Dans la littérature :

Dans la littérature, divers seuils d'effets de surpression sur les structures et sur les hommes sont référencés. Des listes non exhaustives de ces valeurs sont présentées dans les tableaux ci-après.

A l'exception des cas où le pourcentage de cibles affectées est précisé, ces valeurs correspondent aux seuils des premiers effets observés.

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures

<i>Dégâts constatés</i>	<i>Surpression (mbar)</i>	<i>Référence</i>
Bris de vitres :		
➤ Valeur type de bris de vitres	10	
➤ Destruction des vitres ≥ 10 %, limite de petits dommages	20	
➤ Destruction de 50 % des vitres	25	
➤ Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	50	
➤ Destruction totale des vitres, détérioration partielle des maisons	70	
Dégâts légers aux structures	30	
Détérioration et destruction des cadres de fenêtres selon leur nature	100	
Effondrement partiel des murs et tuiles des maisons	140	
Limite inférieure des dégâts graves aux structures	160	
Destruction à 50 % des maisons en briques	170	
Démolition des cadres en acier, légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels		
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage	250	
Destruction des poteaux	350	
Retournement des wagons de chemin de fer, destruction totale des maisons	500	
Destruction des murs en béton armé, destruction totale probable des bâtiments, dommages graves aux machines situées dans les bâtiments industriels	700	
Destruction totale des structures	830	
Dégâts conséquents des structures	350	
Dégâts modérés des structures	170	
Dégâts légers des structures	35	
Murs en briques, d'une épaisseur de 20 à 30 cm détruits	500	
Murs en parpaings détruits	150-200	
		Lannoy (1984) Lees (1996)
		Green Book-TNO (1989)

Dommmages mineurs aux structures métalliques	80-100		
Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations	200		
Ruptures des structures auto-porteuses industrielles	200-300		
Revêtement des bâtiments industriels légers soufflés	300		
Toit d'un réservoir a cédé	70		
La structure porteuse d'un réservoir de stockage circulaire a cédé	1000		
Fissure dans des réservoirs de stockage d'hydrocarbures vides	200-300		
Déformations légères des canalisations	200-300		
Déplacement d'un rack de canalisation, rupture des canalisations	350-400		
Destruction d'un rack de canalisations	400-550		
Renversement de wagons chargés	500		
Dégâts mineurs des structures des maisons	50		Lees, (1996)
Démolition partielle des maisons rendues inhabitables	70		
Déformations légères des cadres métalliques des bâtiments	90		
Effondrement partiel des murs et toits des maisons	140		
Limite inférieure des dommages graves aux structures	160		
Destruction de 50 % des maisons en briques	170		
Légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels, cadres en acier des bâtiments déformés et arrachés de leurs fondations	210		
Destruction des bâtiments en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage	210-280		
Destruction des bâtiments industriels légers	280		
Destruction des poteaux	345		
Destruction quasi complète des maisons	345-480		
Retournement des wagons chargés	480		
Destruction totale des wagons chargés	620		
Destruction totale probable des bâtiments, dommages graves aux machines situées dans les bâtiments industriels	690		

Tableau relatif aux valeurs de seuils d'effets de surpression sur les structures référencées dans la littérature

Seuils d'effets de surpression pour l'homme		
<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Surpression(mbar)</i>	<i>Référence</i>
Létaux (par effets directs : hémorragies pulmonaires)	1000 700 (correspondant potentiellement à 99% de plétalité) 200 (correspondant potentiellement à 1% de létalité)	TNO, 1989 TM5-1300 US Department of the Army, 1990 Centre de recherché du service de santé des armies, 1982
Létaux (par effets indirects)	140	Baker, 1983 ; Lees, 1996 ; Guide MU 90
Irréversibles	50 20 (effets indirects par bris de vitres)	Lees, 1996 ; Guide MU 90
Détérioration des tympans	340 300 (correspondant potentiellement à 1% de plétalité)	INERIS TNO, 1989

Tableau relatif aux valeurs de seuils d'effets de surpression sur l'homme référencées dans la littérature

Remarques sur les seuils d'effets sur l'homme :

D'une façon générale, il est admis que le risque de blessures est susceptible de se matérialiser lorsque les individus sont frappés par des fragments de vitres, de bois, des objets de décoration légers. Ce risque ne devrait pas être fatal tant que les structures plus lourdes comme les murs porteurs ne sont pas atteintes. Le niveau de surpression correspondant pour la détonation d'un explosif condensé est de l'ordre de 50 mbar (Clancey). Il faut cependant garder à l'esprit que les dégâts aux biens peuvent apparaître pour des niveaux de surpression plus petits (10 mbar).

Dès que le risque d'effondrement apparaît, le risque léthal est présent, par effet d'écrasement ou de chocs de fragments massifs. On peut estimer que les dommages aux structures peuvent alors devenir suffisamment importants pour que les moyens de production industriels soient lourdement affectés, notamment les moyens de contrôle. On peut situer le début de ce risque vers 140 mbar (Baker, 1983 ; murs de briques, béton non renforcé) pour la détonation d'un explosif condensé. Ce seuil peut être considéré comme le seuil des premiers effets létaux (1%) dans la population.

III. Valeurs de référence pour les installations classées

Les valeurs de référence des seuils d'effets de surpression retenues pour les installations classées sont :

➤ **pour les effets sur les structures :**

- **20 hPa ou mbar, seuil des destructions significatives de vitres²;**
- **50 hPa ou mbar, seuil des dégâts légers sur les structures;**
- **140 hPa ou mbar, seuil des dégâts graves sur les structures;**
- **200 hPa ou mbar, seuil des effets domino;**
- **300 hPa ou mbar, seuil des dégâts très graves sur les structures.**

➤ **pour les effets sur l'homme :**

- **20 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme¹ ;**
- **50 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;**
- **140 hPa ou mbar, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine;**
- **200 hPa ou mbar, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.**

² Compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à 2 fois la distance d'effet obtenue pour une surpression de 50 mbar.

- Valeurs relatives aux seuils d'effets thermiques

RESUME :

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

- pour les effets sur les structures :
 - 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives;
 - 8 kW/m², seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures;
 - 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton;
 - 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton;
 - 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

 - pour les effets sur l'homme :
 - 3 kW/m² ou 600 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
 - 5 kW/m² ou 1000 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine;
 - 8 kW/m² ou 1800 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.
-

I. Généralités sur les effets thermiques

Deux approches distinctes coexistent pour estimer les effets liés aux flux thermiques. Le fondement de ces deux approches résulte principalement de la durée différente des phénomènes à l'origine de ces flux thermiques, ainsi que de la variabilité dans le temps de ces flux thermiques. Toutefois, il faut garder en mémoire que la durée d'exposition conditionne les effets observés :

- Dans le cas où la durée du phénomène est supérieure à 2 minutes (régime permanent atteint), le calcul des distances d'effets est effectué en terme de flux thermiques exprimés en kW/m^2 ; c'est le cas notamment des feux de nappe, des incendies de stockage et des feux torche ou des feux de solides si la cible potentielle n'est pas en mesure de s'éloigner ou de se protéger de l'incendie en moins de 2 minutes.
- Dans le cas où la durée du phénomène est inférieure à 2 minutes (régime dynamique), le calcul des distances se fait en terme de doses thermiques reçues exprimés en $[(\text{kW/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}]$; c'est le cas notamment de l'inflammation initiale d'une fuite de gaz, d'un BLEVE ou d'un Boil-over où la durée d'exposition n'excède généralement pas 2 minutes compte tenu de la durée du phénomène.

L'explication est déduite de l'observation générale qui montre qu'un même effet thermique E peut être obtenu selon différentes valeurs de la durée d'exposition ' T ' (en secondes) et du flux thermique ' ϕ ' (en kW/m^2) :

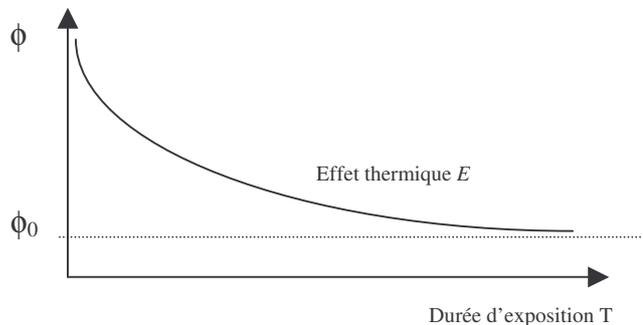


Figure relative à une courbe iso-effet E

Il est à noter que s'il est possible pour l'homme de supporter des flux élevés si l'exposition est très courte, en revanche, une exposition même très longue à un flux suffisamment faible peut ne pas engendrer les effets redoutés.

- De façon intermédiaire, pour des expositions qui perdurent (> 2 minutes) certains seuils d'effets ne dépendent pratiquement plus du temps. Dans ce cas, l'approche par flux thermiques critiques est pertinente.
- Il s'avère aussi que pour les durées d'exposition brèves (< 2 minutes) à des valeurs de flux thermiques élevés, la relation liant un effet thermique E donné au flux thermique et au temps d'exposition est constante et de la forme :

$$E = \Phi^n \times T$$

La littérature spécialisée³ précise dans ces conditions que n est égal à 4/3.

En pratique, lors d'un accident industriel, un observateur n'est généralement pas soumis à un flux thermique constant au cours des premiers instants. Il y a donc lieu de cumuler la valeur de chaque flux thermiques successifs dans le temps. Plus généralement, lorsque le flux thermique reçu est (fortement) variable dans le temps, l'effet thermique dépend de la variable appelée « *charge thermique* » I égale au calcul intégral :

$$I = \int_0^T \phi(t)^{4/3} .dt$$

- où :
- ϕ est le flux thermique reçu à l'instant t , évoluant dans le temps, exprimée en kW/m² ;
 - T la durée totale d'exposition au flux thermique, exprimée en secondes ;
 - et t est le temps, exprimé en secondes (variant de 0 à T s).

et l'effet thermique E redouté a lieu dès lors que :

$$I \geq E$$

L'approche par doses thermiques prévaut dans ce cas.

II. Comparatif des valeurs utilisées en Europe, en France et dans la littérature internationale

En Europe :

Le tableau ci-après présente les valeurs de référence des seuils d'effets thermiques utilisées dans certains Etats membres pour définir les zones devant faire l'objet de mesures de gestion de risques (règles d'urbanisme et de construction, plans de secours externes,...). Ces données sont issues des travaux européens menées par le Joint Research Center à Ispra dans le cadre du groupe de travail Land Use Planning (LUP) (à noter que la justification du choix des valeurs utilisées n'est pas donnée par les Etats membres concernés).

Pays	Seuils thermiques
Autriche Maîtrise de l'urbanisation Effets domino	2 kW/m ² et 12.5 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s 12.5 kW/m ²
Belgique	236 [(kW/m ²) ^{4/3}] (sec)
France	Seuils des effets létaux : 5 kW/m ² et 1000 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s Seuils des effets irréversibles : 3 kW/m ² et 600 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s
Allemagne	1.6 kW/m ²

³ Sources : Lees, 1994 ; Hymes, 1983

Italie	
Zone de forte létalité	12.5 kW/m ²
Zone de première létalité	7 kW/m ²
Zone des effets irréversibles	5 kW/m ²
Zone des effets réversibles	3 kW/m ²
Portugal	-
Angleterre	Zone restreinte (Inner zone) : 1800 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s Zone moyenne (Middle zone) : 1000 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s Zone large (Outer Zone) : 500 [(kW/m ²) ^{4/3}]. s

Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets thermiques utilisées en Europe pour la gestion des risques

Situation française antérieure:

Le guide de la Maîtrise de l'Urbanisation édité par le ministère de l'écologie et du développement durable en 1990 et l'instruction technique jointe à la circulaire du 9 novembre 1989 relative aux dépôts anciens de liquides inflammables retiennent les seuils suivants pour déterminer les distances d'éloignement par rapport aux installations visées :

- le seuil 5 kW/m² pour les effets létaux;
- le seuil 3 kW/m² pour les effets irréversibles.

Dans la littérature :

Dans la littérature, divers seuils d'effets thermiques sur les structures et sur les hommes sont référencés. Des listes non exhaustives de ces valeurs, exprimées en flux ou en doses reçus, sont présentées dans les tableaux ci-après.

A l'exception des cas où le pourcentage de cibles affectées est précisé, ces valeurs correspondent aux seuils des premiers effets observés.

Dans l'attente de l'évolution des connaissances en la matière, les seuils d'effets thermiques sur les structures sont considérés quelque soit le temps d'exposition.

➤ Effets sur les structures :

Seuils thermiques relatifs à la résistance des structures		
<i>Dégâts constatés</i>	<i>Flux radiatif (en kW/m²)</i>	<i>Principales Référence</i>
Bris de vitres	5	API RP 521 (1990)
Propagation de feu improbable, sans mesure de protection particulière	<8	
La peinture cloque	8	GESIP (1991)
Apparition d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles (tels que le bois) en présence d'une source d'ignition	10	
Propagation de feu improbable sans mesure de refroidissement suffisante	<12	
Flux limite de tenue des structures pour une exposition prolongée, hors structure béton	16	Green Book-TNO (1989)
Auto-inflammation du bois	35	
Tenue du béton pendant plusieurs heures	20	

Propagation du feu à des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, même refroidis	<36	
Auto-inflammation des matériaux plastiques thermodurcissables	84	
Ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200	
Inflammation des surfaces exposées au flux radiatif et ainsi rupture ou destruction des éléments de structures selon les cas suivants :		
➤ Bois	15	
➤ Matières synthétiques	15	
Rupture ou destruction des éléments de structures en :		
➤ Verre	4	
➤ Acier	100	
Décoloration importante d'une certaine surface de matériau exposé au flux radiatif, écaillage des peintures et/ou déformations significatives des éléments de structure :		
➤ Bois	2	
➤ Matières synthétiques	2	
➤ Acier	25	

Tableau relatif aux valeurs de seuils d'effets thermiques sur les structures référencées dans la littérature

➤ **Effets sur l'homme :**

Il existe des différences de tolérance au rayonnement thermique d'un individu à l'autre, selon l'âge, l'état physique, la constitution de la peau, ... Les enfants et les personnes âgées sont plus vulnérables.

L'intensité du flux thermique reçu n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. La durée d'exposition est tout aussi importante dans la réponse d'un sujet à un rayonnement thermique.

Le degré de protection offert par les vêtements constitue aussi (jusqu'à un certain point au delà duquel ils s'enflamment eux mêmes) une variable importante.

Les seuils d'effets présentés dans le tableau ci-après sont valides pour des gens habillés de façon courante et dépendent des durées d'exposition (deux cas différenciés : < ou > à 2 minutes).

Seuils d'effets thermiques pour l'homme			
	<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Seuil</i>	<i>Référence</i>
Durée du phénomène supérieure à deux minutes Flux radiatifs exprimés en kW/m ²	Létaux	5	Baker et al. (1983)
	Irréversibles	3	Baker et al. (1983)
Durée du phénomène inférieure à deux minutes Doses thermiques exprimés en	Létaux (100%)	6000-7000	Hymes (1983)
	Brûlures du 3ème degré superficielles	2600	Hymes (1983)
	Létaux (50%)	2200 2000	Hymes (1983) Rew (1997)

[(kW/m ²) ^{4/3}]. s	Brûlures du 2 nd degré sévères	1200	Hymes (1983)
	Létaux (1%)	1000	Baker et al. (1983)
	Irréversibles	600	Baker et al. (1983)
	Brûlures du 2 nd degré superficielles	700	Hymes (1983)
	Brûlures du 1 ^{er} degré	200	Hymes (1983)
	Seuil de douleur	85	Hymes (1983)

Tableau relatif aux valeurs de seuils d'effets thermiques sur l'homme référencées dans la littérature

III. Valeurs de référence pour les installations classées

Les valeurs de référence des seuils d'effets thermiques retenues pour les installations classées sont :

➤ pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m², seuil des destructions significatives des vitres;
- 8 kW/m², seuil des effets domino;
- 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures, hors structures béton;
- 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures;
- 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes;

➤ pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m² ou 600 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des effets irréversibles ;
- 5 kW/m² ou 1000 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des premiers effets létaux;
- 8 kW/m² ou 1800 [(kW/m²)^{4/3}]. s, seuil des effets létaux significatifs.

Valeurs relatives aux seuils d'effets liés à l'impact d'un projectile ou « effets missiles »

RESUME :

Compte tenu des connaissances limitées en matière de détermination et de modélisation des effets missiles, l'évaluation des « effets missiles » d'un accident potentiel nécessite une analyse, au cas par cas, justifiée par l'exploitant et le tiers expert.

Pour la délimitation des zones d'effets sur l'homme ou sur les structures des installations classées, il n'existe pas à l'heure actuelle de valeur de référence. Aussi, cette délimitation s'appuie sur une analyse au cas par cas comme mentionné au premier alinéa.

I. Généralités sur les « effets missiles »

Effets sur l'homme et sur les structures :

L'impact d'un projectile est susceptible de produire deux types d'effets sur l'homme ou sur des structures :

- le choc, qui peut être la cause de fractures sur le corps humain, et entraîner la déformation des structures, éventuellement jusqu'à leur effondrement et leur destruction ;
- la pénétration, que ce soit dans le corps humain ou dans un équipement cible.

Le choc d'un projectile animé d'une quantité de mouvement suffisante peut entraîner sa pénétration dans la cible et conduire à la ruine des équipements.

Pour ce qui est des équipements, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de critères simples qui permettent de caractériser l'effet d'un projectile sur une structure. Celui-ci dépend notamment :

- de la nature de l'équipement cible,
- de la nature du projectile,
- de la quantité de mouvement du projectile.

La très grande variété des équipements cibles rend nécessaire une étude au cas par cas. On conçoit en effet aisément qu'une maison d'habitation, par exemple, possède une résistance mécanique très différente d'un équipement industriel conçu pour résister à de fortes pressions.

Des méthodes permettant d'évaluer les effets de perforation ou d'impact de projectiles massifs existent et sont décrites, par exemple, dans Baker (1983).

Données disponibles :

La réglementation pyrotechnique (arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques) fixe deux seuils liés aux effets de pénétration de fragments de petite taille (moins de 1 kg), exprimés en énergie cinétique du projectile :

- 20 J à la limite Z2 / Z3 (blessures graves pouvant être mortelles) est le seuil de létalité ;
- 8 J à la limite Z3 / Z4 (blessures) est le seuil des blessures significatives.

Pour des projectiles massifs (masse supérieure à 1 kg), il ne semble pas pertinent de raisonner en terme d'énergie cinétique, mais plutôt en terme de vitesse d'impact.

Les données disponibles (Baker, 1983 ; TNO, 1989) suggèrent de retenir, pour caractériser les effets d'un projectile de masse supérieure à 1 kg sur l'homme, les seuils de vitesse d'impact suivants :

- 7 m/s pour le seuil de 10 % de létalité,
- 4 m/s pour le seuil d'apparition des blessures irréversibles (fracture du crâne).

II. Valeurs de référence pour les installations classées

Les valeurs présentées au paragraphe I peuvent être utilisées dans les études de dangers des installations classées. Cependant, compte tenu des connaissances limitées en matière de détermination et de modélisation des effets missiles, l'évaluation des effets missiles d'un accident potentiel nécessite une analyse, au cas par cas, fondée et justifiée par l'exploitant et le tiers expert.

Références

API RP 521-« Règles pour la conception des torches couramment implantées dans l'industrie pétrolière »-American Petroleum Institute, 1990.

Arrêté ministériel du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques.

Baker W.E., Cox P.A., Westin P.S., Kulesz J.J.et Strehlow R.A.(1983). Explosion Hazards and Evaluation. Fundamental studies in engineering n°5; Elsevier; ISBN 0-444-42094-0, vol 5.

Centre de recherché du service de santé des armies, 1982

Circulaire du 9 novembre 1989 relative aux dépôts anciens de liquides inflammables.

GESIP-« Les accidents de gaz liquéfiés (le BLEVE) » rapport GESIP n°91/05, 1991.

Guide technique (1990). Maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Guide technique (1998). Courbes de toxicité aiguë par inhalation – Fiches techniques. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Guide technique (2003). Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère - Seuils de toxicité aiguë. Ministère de l'écologie et du développement durable – INERIS.

Hymes (1983). The physiological and pathological effects of thermal radiation, REP SRD R275, UK.

INERIS (2002). Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels. Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets thermiques / Ω-5.

ISO/DIS 13344 (1996). Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents.

Lannoy A. (1984). Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre, Bulletin de la direction des études et recherches n° 4.

Lees, F.P. (1996). Loss Prevention in the Porcess Industries. Butterworths, London.

Rew (1997). LD50 equivalent for the effect of thermal radiation on humans, rapport HSE 129/1997.

TM5-1300 US Department of the Army, 1990.

TNO (1989). Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from hazardous materials. Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances.(CPR. ISSN 0921-9633; 16) ISBN 90-5397-052-4.

Remerciements

Le guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets pour les installations classées a été réalisé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) en collaboration avec l'INERIS.

Merci aux personnes qui, par leurs observations et leurs contributions, ont permis d'aboutir au présent document :

- Ghislaine VERRHIEST / MEDD - Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – Service de l'environnement industrie ;
- Jan RUGE-SAWICKI / MEDD - Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – Service de l'environnement industrie ;
- Pascale VIZY/ MEDD - Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – Service de l'environnement industrie ;
- Marielle MULLER / MEDD- Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – Service de l'environnement industrie ;
- Alain BARAFORT / DRIRE Midi-Pyrénées
- Gérard KAMALSKI / DRIRE Nord-Pas-de-Calais
- Annick PICHARD / DRC-INERIS
- Françoise ABIVEN / DRA-INERIS
- Jean-Christophe COUILLET / DRA-INERIS
- Nelson RODRIGUES / DRA-INERIS
- Stéphane DUPLANTIER / DRA-INERIS
- le groupe d'experts toxicologues auprès du MEDD et plus particulièrement : Alain BAERT, Centre Anti-Poison de Rennes; Patrick BRETON, Centre d'Etudes du Boucher ; Christianus DEROOIJ, Solvay et Dominique LAFON, INRS, groupe d'experts toxicologues.