

# **Circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28 décembre 2006 relative à la mise à disposition du guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes et des fiches d'application des textes réglementaires récents**

PJ : Guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes (révision du guide de 2003)

- Fiche 1. Eléments pour la détermination de la gravité des accidents
- Fiche 2. Phénomènes de dispersion atmosphérique
- Fiche 3. Phénomène d'UVCE (GPL, hors unité)
- Fiche 4. Phénomène de BLEVE (GPL, hors unité)
- Fiche 5. Cotation en probabilité et en gravité des accidents découlant de dispersion toxique et d'UVCE
- Fiche 6. fuites de tuyauteries : Représentation et cotation
- Fiche 7. Mesures de maîtrise des risques fondées sur une activité humaine
- Fiche 8. Traitement particulier de certains événements initiateurs

## **Introduction**

La loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a imposé l'introduction de l'estimation de la probabilité, la gravité et la cinétique au sein des études de dangers remises par les exploitants des installations soumises à autorisation. L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 est venu compléter cette exigence législative par la détermination de seuils réglementaires pour apprécier l'intensité des effets physiques des phénomènes dangereux, la gravité des accidents et les classes de probabilité de ces phénomènes et accidents.

Il m'est apparu utile, pour aider à la rédaction mais aussi à la lecture des documents remis par les exploitants, de réviser le guide des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes ainsi que de rédiger des fiches d'application de ces textes réglementaires, qui sont désormais disponibles sur le site Internet (1) de mon ministère et que vous trouverez en copie dans le présent pli.

Je souhaite insister sur le caractère facultatif de l'utilisation par les exploitants des règles définies dans les présentes fiches. En particulier, d'autres règles ou d'autres options peuvent être retenues sous réserve qu'elles soient :

- conformes aux exigences réglementaires et aux principes généraux exprimés dans les fiches,

- correctement explicitées et justifiées.

A contrario, je vous demande de bien vouloir considérer que les études de dangers qui vous seront remises et qui respecteront les principes de ces fiches sont réalisées selon une méthodologie qui est conforme aux exigences des textes réglementaires.

Je vous signale par ailleurs quelques éléments complémentaires relatifs à chacune de ces fiches :

## **1. Guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes**

Ce document, évolution du guide du 25 juin 2003 suite à la publication des textes de 2005, a été élaboré avec le concours d'un groupe de travail constitué de représentants des industriels, des bureaux d'étude, des représentants de l'administration au niveau central et dans les services déconcentrés.

Ce guide définit les éléments que l'on doit nécessairement retrouver dans les documents remis par les établissements soumis à autorisation avec servitudes.

Il ne s'agit en aucun cas d'un plan-type qu'il faudrait obligatoirement suivre, mais bien d'une série d'éléments à retrouver dans les études de dangers. Pour les installations soumises à autorisation " simple ", dans l'attente de la publication du guide correspondant, il convient de garder à l'esprit le principe de proportionnalité.

## **2. Fiche n° 1 : Eléments pour la détermination de la gravité**

L'objectif de cette fiche est de fournir à tous des règles de comptage des personnes se trouvant exposées à des effets (létaux ou irréversibles) dans les zones qui auront été définies dans une étude de dangers.

Comme pour les autres fiches, les exploitants peuvent proposer des méthodologies alternatives pour réaliser ce comptage, que vous pourrez accepter lorsque leur conformité aux exigences réglementaires est démontrée. En particulier, ces méthodologies devront faire apparaître le cas le plus défavorable en terme d'occupation de l'espace (ERP occupé à hauteur de sa capacité d'accueil etc. sous réserve que le jeu d'hypothèses retenu soit réaliste), afin de répondre à l'exigence de l'arrêté ministériel

du 29 septembre 2005 qui impose en son article 10 de compter dans ces zones le nombre de personnes "potentiellement exposées".

Je rappelle toutefois que ce terme "exposées" permet de ne pas prendre en compte des personnes se trouvant dans ces zones mais dont les plans d'urgence permettent la mise à l'abri ou dont certaines dispositions constructives permettent de considérer qu'elles ne sont en réalité pas exposées aux effets redoutés.

La deuxième partie de cette fiche crée une règle de calcul particulière pour les établissements industriels voisins. Cette règle constitue un aménagement à ma circulaire du 29 septembre 2005. Prenant en compte la réalité de la structure industrielle de notre territoire ainsi que la culture du risque des salariés intervenant sur ces sites industriels, cette fiche définit des conditions de coopération entre industriels qui conduisent à ne pas prendre en compte certains des travailleurs des établissements voisins dans la détermination de la gravité et donc dans l'appréciation de la démarche de maîtrise des risques telle qu'elle a été précisée dans la circulaire suscitée (notamment au moyen de la matrice de l'annexe 2, dite "MMR").

Les accidents concernés seront donc cotés en gravité et placés dans la grille d'appréciation sans tenir compte de la gravité correspondant aux personnes formées et informées.

J'appelle vivement votre attention sur la nécessité de ne pas s'arrêter définitivement pour autant dans la démarche de réduction du risque à la source pour les phénomènes dont les distances d'effets toucheraient seulement ces travailleurs.

Par ailleurs, je vous rappelle que les principes du règlement du PPRT sont indépendants de la détermination de la gravité. Ainsi, même si la gravité d'un accident est d'un niveau limité par l'absence de prise en compte des salariés du voisin, si l'aléa est d'un niveau important, des mesures lourdes pourront tout de même être prises dans le cadre du PPRT (mesures foncières par exemple).

### **3. Fiche n° 2 sur la dispersion toxique**

Cette fiche, plus technique que " de doctrine " vise à préciser certains aspects des mécanismes de dispersion atmosphérique et de modélisation.

### **4. Fiches n° 3 et 4 : UVCE - BLEVE**

Ces fiches sont issues des travaux du groupe de travail national relatif au GPL, piloté par la DRIRE Bretagne.

Contrairement aux autres documents joints à cette circulaire, la rédaction des fiches BLEVE et UVCE n'a pas pour origine le nouveau contexte réglementaire mais la nécessité pour les inspecteurs des installations classées de disposer d'une description de ces deux phénomènes dans le cas spécifique des stockages de propane ou butane hors raffinerie et pétrochimie. Elles sont des éléments indispensables pour la lecture des études de dangers mais peuvent être également utilisées par les inspecteurs comme support de communication en CLIC, CHSCT, S3PI (2) par exemple, être notamment utilisées pour expliquer les incertitudes des modélisations (hypothèses, conditions météo, différents modèles,...) et le fait que les valeurs annoncées ne sont qu'un ordre de grandeur.

(2) CLIC : comités locaux d'information et de consultation, CHSCT : comités d'hygiène de sécurité et des conditions de travail, S3PI : secrétariats permanents pour la prévention des pollutions industrielles

## **5. Fiche n° 5 : Cotation en probabilité et en gravité des accidents découlant de dispersion toxique et d'UVCE**

Cette fiche donne des propositions pour sélectionner des accidents représentatifs lors de l'apparition incontrôlée d'un nuage de gaz (toxique ou inflammable) alors qu'il n'est pas possible a priori de connaître les conditions de vent (stabilité, vitesse, direction) qui prévaudront le jour de l'accident. Comme pour la fiche n°1, l'exploitant peut proposer d'autres options de détermination des accidents représentatifs, pour peu que le cas le plus défavorable en terme de gravité apparaisse d'une façon ou d'une autre.

Si plusieurs accidents possibles sont représentés par l'exploitant, doivent apparaître a minima le cas le pire et le cas le plus probable.

## **6. Fiche n° 6 relative aux tuyauteries**

Cette fiche s'appuie sur les réflexions menées par le groupe de travail Etudes de dangers auprès du CSIC.

L'esprit de cette fiche est différent de celui des fiches présentées ci-dessus. Elle a en effet pour vocation de présenter une méthode possible de représentation et cotation des phénomènes dangereux et accidents pouvant se produire sur les tuyauteries. Elle pourra notamment servir de méthode-type lorsque l'exploitant ne dispose pas d'autre référentiel. Elle n'a cependant aucune vocation universelle et vous pourrez accepter d'autres méthodologies.

## **7. Fiche n° 7 Mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine**

La réglementation permet de prendre en compte, aux côtés des mesures de maîtrise des risques fondées sur des dispositifs techniques, les mesures intégrant une ou plusieurs intervention(s) humaine(s).

Il m'est apparu pertinent de définir certains principes pour leur prise en compte et leur évaluation, au regard de l'extrême diversité des situations rencontrées, et des études qui ont été réalisées sur ce sujet très complexe.

Ainsi, la fiche relative aux mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine apporte des éléments permettant de retenir une mesure de sécurité pour l'évaluation de la probabilité, en se basant sur les critères mentionnés à l'article 4 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005: efficacité, cinétique, testabilité et maintenance. Elle apporte aussi des critères d'appréciation de la fiabilité de ces mesures, en explicitant les facteurs (formation, communication entre opérateurs, conditions de travail, etc.) qui peuvent influencer ces performances.

Je rappelle toutefois que les exploitants, sous réserve de justification suffisante, peuvent formuler des propositions différant des indications données dans cette fiche.

## **8. Fiche n° 8 : Traitement particulier de certains événements initiateurs**

Certains événements initiateurs d'accidents ont toujours été considérés de façon spécifique dans notre réglementation (notamment les agressions naturelles) au travers de normes reconnues au niveau national.

L'objet de cette fiche est d'indiquer une méthodologie pour les prendre en compte de façon appropriée dans le nouveau contexte réglementaire.

Par ailleurs, dans la mesure où ils ne sont pas compatibles avec la nouvelle démarche d'analyse et de gestion du risque, les textes prescrivant des distances d'isolement sont en cours de révision par mes services.

Je vous rappelle également que la circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements dits " SEVESO ", visés par l'arrêté du 10 mai 2000 modifié a été publiée au Bulletin Officiel du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

(BOMEDD) le 15 novembre 2005 avec un rectificatif au BO MEDD du 30 janvier 2006.

Je vous prie de bien vouloir me rendre compte sous le timbre du directeur de la Prévention des Pollutions et des Risques, des éventuelles difficultés que soulèverait l'application de ces principes.

Pour la Ministre et par délégation,  
Le Directeur de la Prévention des Pollutions et des Risques ;  
Délégué aux risques majeurs,  
Laurent MICHEL

(1) [http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id\\_rubrique=713](http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=713)

(2) CLIC : comités locaux d'information et de consultation, CHSCT : comités d'hygiène de sécurité et des conditions de travail

## **Fiche 1 : EDD : Eléments pour la détermination de la gravité des accidents**

Afin de déterminer la gravité potentielle d'un accident dans les études de dangers des installations soumises à autorisation, et en particulier des établissements Seveso (c'est à dire les établissements relevant de l'arrêté du 10 mai 2000 modifié), il est nécessaire de pouvoir compter aussi simplement que possible, selon des règles forfaitaires, le nombre de personnes exposées.

Cette fiche constitue une indication d'une méthode possible pour la détermination de la gravité.

D'autres approches sont possibles à condition d'être raisonnablement conservatoires et d'être expliquées dans l'EDD. S'agissant ici de déterminer la gravité des accidents, cette fiche n'a aucun lien avec la démarche PPRT (détermination de l'aléa, règles d'urbanisme...)

### **Principe général**

L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation (appelé dans la suite de la fiche " arrêté PCIG ") prescrit la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées (" en tenant compte, le cas échéant, des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et de la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident si la cinétique de l'accident le permet "). Il convient donc, quelle que soit la méthodologie retenue, de

faire apparaître (éventuellement parmi d'autres) l'accident le plus pénalisant en terme de gravité.

Dans la mesure où il n'est pas possible de prévoir les conditions de l'environnement le jour où se produira l'accident (direction du vent, vacances scolaires, heure d'encombrement sur les routes, etc.), une première possibilité simple sera à chaque fois de considérer un accident représentatif présentant :

- la gravité la plus pénalisante (ex : routes encombrées, écoles aux heures scolaires...)
- la probabilité prise égale à celle du phénomène dangereux

On peut aussi retenir un jeu d'hypothèses décrivant plusieurs accidents, parmi lesquels doit figurer l'accident à la gravité la plus pénalisante (auquel sera ici associée une probabilité plus faible pour tenir compte de la direction du vent, ou de la probabilité qu'il y ait des bouchons, etc.)

Pour ce qui est de la prise en compte des conditions météorologiques pour la détermination de la gravité, il convient de se reporter à la fiche n° 5 relative à la représentation et cotation en probabilité – gravité des phénomènes de dispersion atmosphérique.

## **1. Méthodologie de comptage des personnes pour la détermination de la gravité des accidents**

Les paragraphes 1.1 à 1.7 sont principalement utiles pour les établissements Seveso ; pour les installations A non incluses dans un établissement Seveso, il convient de se reporter au paragraphe 1.8.

### **1.1. Zones d'effets et identification des ensembles homogènes Déterminer la surface des zones d'effets sortant du site pour chaque type d'effet.**

Dans chaque zone couverte par les effets d'un phénomène dangereux issu de l'analyse de risque, identifier les ensembles homogènes (ERP, zones habitées, zones industrielles, commerces, voies de circulation, terrains non bâtis...) et en déterminer la surface (pour les terrains non bâtis, les zones d'habitat) et/ou la longueur (pour les voies de circulation).

Remarque : il convient d'éviter de compter plusieurs fois une personne selon qu'elle se trouve, par exemple, sur son lieu de travail ou dans son logement. Pour chaque accident envisagé, elle doit alors être comptée uniquement dans la zone où elle est soumise à l'intensité la plus élevée. En première approche toutefois, cette précision peut être omise.

### **1.2. Etablissements Recevant du Public (ERP)**

Compter les ERP (bâtiments d'enseignement, de service public, de soins, de loisir, religieux, grands centres commerciaux etc.) en fonction de leur

capacité d'accueil (au sens des catégories du code de la construction et de l'habitation), le cas échéant sans compter leurs routes d'accès (cf. paragraphe 1.5).

Les commerces et ERP de catégorie 5 dont la capacité n'est pas définie peuvent être traités de la façon suivante :

- compter 10 personnes par magasin de détail de proximité (boulangerie et autre alimentation, presse, coiffeur)
- compter 15 personnes pour les tabacs, cafés, restaurants, supérettes, bureaux de poste.

Les chiffres précédents peuvent être remplacés par des chiffres issus du retour d'expérience local pour peu qu'ils restent représentatifs du maximum de personnes présentes et que la source du chiffre soit soigneusement justifiée.

### **1.3. Zones d'activités**

Zones d'activités (industries et autres activités ne recevant pas habituellement de public) : prendre le nombre de salariés (ou le nombre maximal de personnes présentes simultanément dans le cas de travail en équipes), le cas échéant sans compter leurs routes d'accès.

### **1.4 Logements**

Pour les logements : compter la moyenne INSEE par logement (par défaut : 2,5 personnes), sauf si les données locales indiquent un autre chiffre.

A défaut de données précises sur les logements, on peut également suivre une règle forfaitaire simplifiée (applicable en milieu urbain et périurbain, hors centres villes et grandes agglomérations), quitte à affiner si besoin :

<b>Type d'habitat</b>	<b>Nombre de personnes à l'hectare</b>
Individuel dispersé	40
Pavillonnaire dense	100
Collectif ≤ R+2	400-600
Collectif Immeuble >R+2	600-1000

### **1.5 Voies de circulation**

Les voies de circulation n'ont à être prises en considération que si elles sont empruntées par un nombre significatif de personnes qui ne sont pas déjà comptées parmi les personnes exposées dans d'autres catégories d'installations (en tant qu'habitation, commerce, etc.) situées dans la même zone d'effets, les temps de séjours en zone exposée étant généralement très supérieurs aux temps de trajets. Il en est de même des commerces de proximité, écoles (1), mairies... majoritairement fréquentées par des personnes habitant la zone considérée.

L'étude de dangers doit toutefois au moins lister toutes ces voies de circulation.

*(1) maternelles et primaires*

### **1.5.1 Voies de circulation automobiles :**

**Option 1** : si l'axe de circulation concerné est susceptible de connaître des embouteillages fréquemment pour d'autres causes qu'un accident de la route ou qu'un événement exceptionnel du même type, compter 300 personnes permanentes par voie de circulation et par kilomètre exposé. (exemple : autoroute à 2 fois 3 voies : compter 1800 personnes permanentes par kilomètre).

Sinon compter 0,4 personne permanente par km exposé par tranche de 100 véhicules/jour.

Exemple : 20 000 véhicules/j sur une zone de 2 km =  $0.4 * 2 * 20000/100$   
= 160 personnes.

**Option 2** : Une autre méthode de comptage pourrait être utilisée par l'industriel, sous réserve d'une justification (par exemple sur la base de la vitesse limite autorisée sur la voie considérée...).

### **1.5.2 Voies ferroviaires**

**Train de voyageurs** : compter 1 train équivalent à 100 véhicules (soit 0.4 personne exposée en permanence par km et par train), en comptant le nombre réel de trains circulant quotidiennement sur la voie.

### **1.5.3 Voies navigables**

Compter 0.1 personne permanente par km exposé et par péniche/jour.

### **1.5.4 Chemins et voies piétonnes**

Les chemins et voies piétonnes ne sont pas à prendre en compte, sauf pour les chemins de randonnée, car les personnes les fréquentant sont généralement déjà comptées comme habitants ou salariés exposés.

Pour les chemins de promenade, de randonnée : compter 2 personnes pour 1 km par tranche de 100 promeneurs/jour en moyenne.

## **1.6 Terrains non bâtis**

Terrains non aménagés et très peu fréquentés (champs, prairies, forêts, friches, marais...) : compter 1 personne par tranche de 100 ha.

Terrains aménagés mais peu fréquentés (jardins et zones horticoles, vignes, zones de pêche, gares de triage...) : compter 1 personne par tranche de 10 hectares.

Terrains aménagés et potentiellement fréquentés ou très fréquentés (parkings, parcs et jardins publics, zones de baignades surveillées, terrains de sport (sans gradins)... ) : compter la capacité du terrain et a minima 10 personnes à l'hectare.

Dans les cas de figure précédents, le nombre de personnes exposées devra en tout état de cause être au moins égal à 1, sauf démonstration de l'impossibilité d'accès ou de l'interdiction d'accès.

### **1.7 Cas spéciaux (occupations extrêmement temporaires)**

Ce genre de cas, tels que les manifestations regroupant un très grand nombre de personnes pendant quelques jours par an (festival des inter-celtiques de Lorient, Francfolies de La Rochelle, ...) est à compter à part.

Il est en effet très difficile de tenir compte de ces variations d'occupation très fortes. De manière intuitive, il est peu satisfaisant (et ingérable) de prendre la moyenne d'occupation comme de prendre le maximum d'occupation.

Il est conseillé de ne pas les évaluer en tant que tel dans la gravité, mais de consacrer un paragraphe spécial à la manifestation considérée, en prévoyant des mesures spéciales (pré-activation du PPI ou arrêt/activité réduite de l'entreprise pendant la durée de la manifestation (pas de dépotage...) ou interdiction de la manifestation...).

Les mesures mises en œuvre lors de cet événement doivent toutefois être soigneusement et précisément décrites dans l'étude de dangers, et il conviendra de chercher à éviter que de telles manifestations importantes se déroulent à proximité de l'installation à risques.

### **1.8. Cas des études de dangers réalisées pour des installations A non incluses dans un établissement classé Seveso**

Pour ces installations, les règles peuvent être encore plus simples, on peut donc partir sur des estimations très forfaitaires de nombre de personnes à l'hectare selon le type de zone :

Rural : Habitat très peu dense à 20 p/ha / Semi-rural : 40-50 p/ha / Urbain 400-600 p/ha / Urbain dense: 1000 p/ha

Cette estimation ne dispense toutefois pas d'ajouter la contribution des voies de circulation et des zones d'activités.

## **2. Cas particulier des salariés des entreprises voisines ou des sous-traitants**

### **2.1. Sous-traitants**

Les sous-traitants intervenant dans l'établissement (ou installation) et pour le compte de l'exploitant réalisant l'étude de dangers ne sont pas à considérer comme des tiers au sens du code de l'environnement. Ils ne correspondent à aucun des intérêts visés à l'article L.511-1 du code de l'environnement. Il n'en va évidemment pas de même pour les installations et équipements que ces entreprises peuvent posséder hors des limites de l'établissement ; dans ce cas, se référer au paragraphe suivant.

### **2.2. Entreprises voisines**

Un cas particulier peut être considéré pour la détermination de la gravité d'un accident potentiel, vis-à-vis des personnes travaillant dans les entreprises voisines.

On peut considérer que ces personnes sont, du fait de leur niveau d'information et de leur proximité industrielle avec le site à l'origine du risque, moins vulnérables que la population au sens général et donc moins exposées (au sens de l'AM " PCIG " du 29 septembre 2005).

Dans la suite de cette partie, l'exploitant à l'origine du risque sera appelé X et l'entreprise voisine sera appelée Y.

Il est proposé d'accepter le comptage suivant :

les personnes travaillant dans l'entreprise Y peuvent ne pas être comptées comme exposées au sens de l'arrêté " PCIG " du 29 septembre 2005 si et seulement si les conditions suivantes sont remplies :

1) l'exploitant X et l'entreprise Y disposent d'un POI ou l'entreprise Y est incluse dans le POI élaboré par l'exploitant X

2) les deux POI (lorsque Y n'est pas incluse dans le POI de X) sont rendus cohérents notamment :

- a. par l'existence dans le POI de Y de la description des mesures à prendre en cas d'accident chez X;
- b. par l'existence d'un dispositif d'alerte / de communication permettant de déclencher rapidement l'alerte chez Y en cas d'activation du POI chez X
- c. par une information mutuelle lors de la modification d'un des deux POI
- d. le cas échéant, par la précision duquel des chefs d'établissement prend la direction des secours avant le déclenchement éventuel du PPI
- e. par une communication par X auprès de Y sur les retours d'expérience susceptibles d'avoir un impact chez Y

f. par une rencontre régulière des deux chefs d'établissements ou de leurs représentants chargés des plans d'urgence

3) un exercice commun de POI est organisé régulièrement

**NB** : Au-delà de ces règles forfaitaires de comptage et des actions menées pour éviter que les salariés ne soient exposés, il est néanmoins vivement conseillé de mettre en place des dispositions constructives permettant d'assurer la protection physique de ces salariés (ex : salle de contrôle blastproof).

## **Fiche 2 : La dispersion atmosphérique**

Cette fiche a été établie avec le concours de l'INERIS

La présente fiche a été rédigée sur la base des données scientifiques disponibles et portées à la connaissance des auteurs. Les informations présentées reflètent un " état de l'art " à la date d'émission de la fiche. Elles sont susceptibles d'évoluer avec le progrès des connaissances scientifiques relatives aux phénomènes étudiés.

### **La dispersion atmosphérique : rappel**

Le terme dispersion atmosphérique peut désigner soit un phénomène dangereux tel que défini dans le glossaire technique des risques technologiques (1) (octobre 2005 – MEDD) soit le phénomène physique c-à-d les mécanismes physiques de mélange d'une substance dans l'air de l'atmosphère. La dispersion atmosphérique correspond au devenir d'un nuage de produit dangereux (substance inflammable, toxique...) dans le temps et dans l'espace. Dans le cadre de la présente fiche et sauf mention contraire, le terme de dispersion atmosphérique désigne les mécanismes physiques qui peuvent être modélisés.

(1) Rupture d'une canalisation à x% de section contenant le produit Y avec une durée de fuite de z minutes.

### **1. Introduction / démarche**

Le but de cette fiche est de préciser et d'expliquer les paramètres à prendre en compte dans la démarche et dans les résultats de la modélisation des effets de dispersion, afin de la comprendre et pour y porter un regard critique (logique et cohérence de la démarche).

La modélisation des effets des phénomènes dangereux a 2 objectifs. Elle permet certes d'évaluer les distances d'effets demandées par la réglementation dans une étude de dangers (EDD) mais aussi et surtout de

conforter des choix techniques (par exemple la conception d'un réseau de capteurs - nombre et positionnement - d'une chaîne de détection de fuite afin d'optimiser la cinétique de détection/réaction). La figure 1 illustre la démarche de modélisation d'une dispersion atmosphérique.

### Étapes de la modélisation pour une EDD

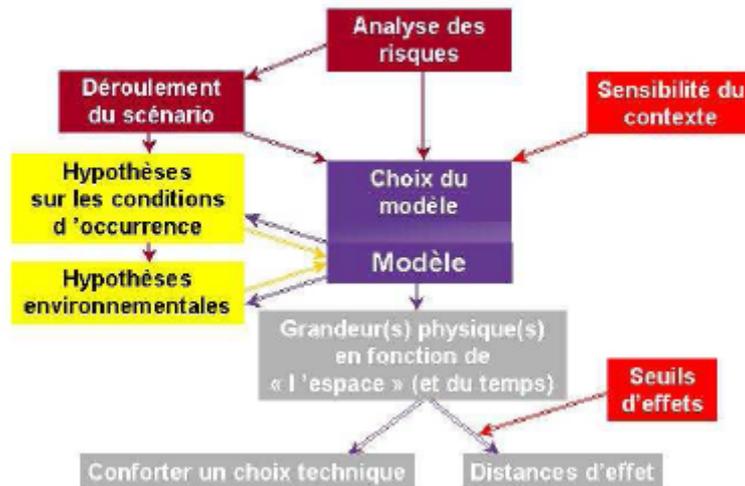


Figure 1 : Les étapes de la modélisation pour une EDD [INERIS]

## 2. Théorie

La modélisation des effets d'un phénomène accidentel comprend 3 composantes, à savoir les modélisations du " terme source ", de la " propagation " de cette source dans l'environnement et l'effet sur les " cibles ".

La dispersion atmosphérique d'un produit rejeté accidentellement dépend essentiellement :

- des caractéristiques de la source d'émission (énergie cinétique, direction du rejet, densité du produit rejeté, durée de la fuite, conditions de la fuite...)
- des conditions météorologiques comme la vitesse du vent, la stabilité de l'atmosphère, l'hygrométrie, la température ambiante ;
- des conditions orographiques, c'est-à-dire essentiellement l'état de " rugosité " du sol qui varie selon qu'il s'agisse d'un champ cultivé, d'une forêt, d'une zone industrielle...

Différents processus dont l'importance relative dépend des conditions de rejet entrent en jeu et agissent simultanément ou successivement. Ces différents mécanismes physiques sont présentés dans un rapport INERIS (1).

Ce rapport souligne les grandeurs qui vont dimensionner l'évaluation des effets qui en résultent.

*(1) Rupture d'une canalisation à x % de section contenant le produit Y avec une durée de fuite de z minutes.*

## **2.1. Terme Source**

En amont de la modélisation de la dispersion atmosphérique d'une substance, il convient généralement de caractériser un " terme source ".

On entend par " terme source ", tout ce qui conditionne la formation du nuage dangereux, c'est-à-dire les caractéristiques de la source d'émission initiale éventuellement modifiées par le champ proche. Par exemple, la source d'émission initiale est caractérisée par le type de produit (état physique, quantité), sa pression, sa température qui conditionnent le débit, l'état physique et la vitesse à la brèche etc. Son " environnement proche " est par exemple la présence d'un mur (jet dit " impactant "), d'un local de confinement etc. qui influencent directement le devenir du terme source initial (devenir de la fraction liquide, évaporation de flaque etc.).

Il faut souligner l'importance de la quantification du terme source. Quel que soit l'outil de calcul utilisé, la caractérisation du terme source doit être la meilleure possible. En effet, le phénomène physique qui en résulte (la dispersion atmosphérique en l'occurrence) ne peut être correctement appréhendé si le terme source n'a pas été bien évalué.

Généralement, la détermination du terme source peut s'effectuer soit forfaitairement (2), soit de manière spécifique (par exemple via l'utilisation d'un outil intégral qui caractérise le terme source (3)). A l'heure actuelle et compte tenu des avancées en termes de codes de calculs, une détermination forfaitaire du terme source est de moins en moins adaptée.

Il est à noter que se développent actuellement des caractérisations plus poussées du terme source afin d'affiner les Calculs (4). A ce stade, cela concerne souvent des études spécifiques (compléments d'EDD) où des précisions sont recherchées, par exemple pour conforter des choix techniques. Pour plus d'information, le lecteur se reportera utilement au rapport INERIS relatif à la détermination du terme source [2].

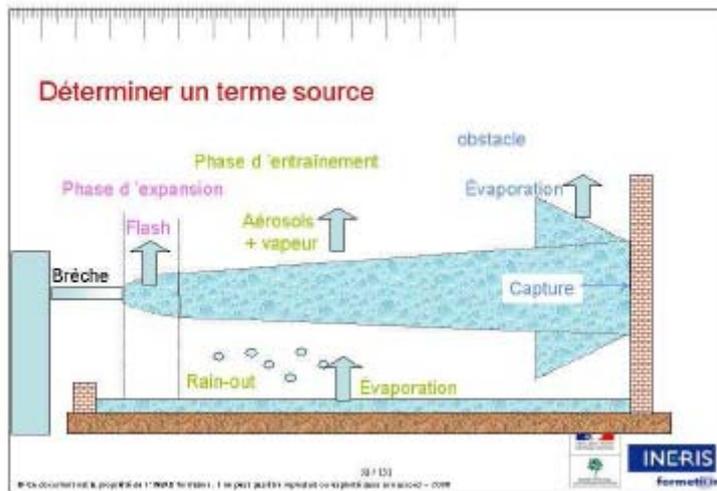


Figure 2 : exemple d'éléments constituant un terme source [INERIS]

Indépendamment des caractéristiques propres du fluide, les paramètres les plus importants pour définir la typologie d'un rejet sont :

- Le débit massique de fuite pour un rejet continu ou la quantité totale rejetée pour un rejet instantané
- La vitesse du rejet => plus la vitesse de rejet est grande, plus vite le polluant est dilué dans l'air
- La section principale de fuite => plus cette section est faible, plus le débit sera petit (5) – toutes conditions égales par ailleurs.

Nota : dans le cas d'une rupture guillotiné, deux débits sont à prendre en compte (cf 4.2 v).

(2) On peut citer à titre d'exemple d'une détermination forfaitaire : assurer que, quelle que soit la brèche initiale, la fraction flashée aura une évaporation de 30%, le reste faisant une flaque au sol.

(3) On peut citer à titre d'exemple la détermination par le calcul via un outil intégral d'un débit d'aérosol ( vitesse et débit moyen des gouttelettes etc.) pour un rejet di-phasique.

(4) On peut citer à titre d'exemple la prise en compte de la taille des gouttelettes et de leur vitesse, la prise en compte de rejets impactants etc. Ces modélisations très fines du terme source requièrent généralement des outils développés spécifiquement pour ce type d'étude.

(5) Pour un débit constant, l'air dilue plus facilement le rejet si la section de fuite est faible.

**Cas particulier du confinement :**

Dans le cas d'un rejet en milieu confiné, le jet va probablement impacter des obstacles. Le comportement de l'ensemble diffère de celui d'un rejet en milieu libre. Il faut non seulement étudier les fuites par la cheminée d'extraction, mais aussi les fuites par les interstices du bâtiment, qui peuvent être significatives si l'extraction est insuffisante ou hors service [2]. Ce terme source est souvent occulté ou mal pris en compte car il nécessite une bonne compréhension des phénomènes et parce que les modèles intégraux considèrent seulement le régime permanent de la fuite. La bonne prise en compte du confinement requiert une modélisation très fine du terme source et par conséquent un outil adapté, souvent développé spécifiquement. Le temps de fuite à l'intérieur du confinement peut être différent du temps de rejet du confinement.

Ainsi, il est important de vérifier les hypothèses retenues dans ce cas particulier. Pour se rendre compte " rapidement " si un confinement a été " correctement " envisagé, il convient dans un premier temps de comparer le débit de fuite au débit d'extraction ; dans le cas où l'extraction ne permet pas de couvrir la fuite, de s'assurer que les fuites au niveau des parois ont été prises en compte. Il convient également de s'assurer des conditions d'extraction (l'extraction dure-t-elle suffisamment longtemps ? Est elle asservie à un capteur ? Quel est le délai pour atteindre le débit d'extraction maximal ? etc. ).

La figure 3 indique le principe de calcul de la dose pour un rejet impactant et confiné.

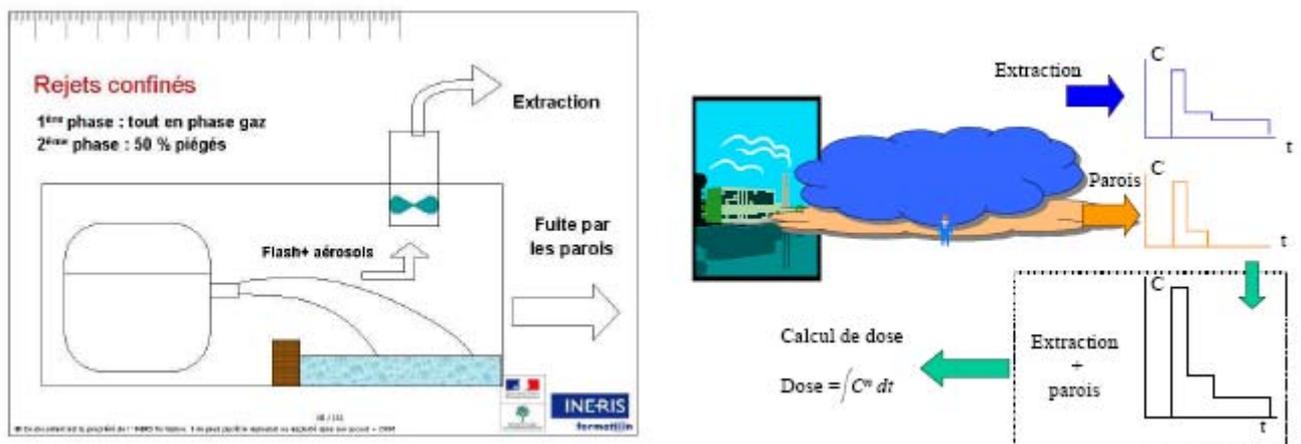


Figure 3 : Principe de calcul de la dose pour un rejet impactant et confiné [INERIS]

## 2.2. Dispersion

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir, dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère. Elle caractérise donc la façon dont le nuage est transporté et dilué (effets de turbulence, gravité, ...)

Les deux phénomènes physiques régissant l'évolution du nuage dans l'atmosphère sont le déplacement du nuage et la dilution du nuage

L'évolution du nuage dans l'atmosphère est principalement régie par :

- la densité du nuage par rapport à l'air (gaz léger / lourd / neutre)
- les conditions de rejet : durée du rejet (continu – instantané), dilution du nuage - entraînement d'air (quantité de mouvement initiale, cisaillement du champ de vent), géométrie de la source (ponctuelle – surfacique), hauteur du rejet (sol – altitude), échanges thermiques
- les conditions météorologiques : vitesse du vent et stabilité atmosphérique (6),
- les conditions orographiques : obstacles, rugosité, relief, occupation du sol

La difficulté majeure en dispersion atmosphérique est que généralement, chaque grandeur influant sur le phénomène a deux actions antagonistes : il est donc très difficile de déterminer a priori si la variation d'un paramètre dans un sens va plutôt aller dans le sens d'une approche conservatrice ou non.

*(6) Les paramètres de température extérieure et de taux d'humidité ont généralement, et sauf cas particuliers (ex. HF), une importance moindre au regard des incertitudes globales des modélisations. On pourra se référer à ce sujet à l'étude INERIS en référence [9]*

### **3. Modélisation : Outils de calculs**

Trois principales familles d'outil de calcul existent. Elles sont citées ci-après par ordre de complexité croissante :

- les **modèles gaussiens** qui permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs de masse volumique très proche de celle de l'air ;
- les **modèles intégraux** à utiliser dès que le rejet perturbe l'écoulement atmosphérique de l'air.

Pour la modélisation des nuages de gaz passifs (dès leur rejet ou après une dilution suffisamment importante), l'outil intégral utilise un modèle gaussien ;

- les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics), parfois appelés outils 3D, qui permettent de résoudre les équations de la mécanique des fluides.

**Il appartient à l'exploitant de s'assurer de l'adaptation du niveau de complexité de l'outil aux mécanismes physiques à modéliser et au contexte. L'inspection des installations classées vérifie si le**

**modèle choisi est adapté au rejet considéré et à son environnement.**

### **3.1. Modèles gaussiens**

#### **3.1.1. Généralités**

Un modèle gaussien permet de modéliser la dispersion d'un gaz du fait de la seule action du fluide porteur, l'air. Le transport et la diffusion du gaz vont alors dépendre du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

#### **3.1.2. Domaine de validité**

Le modèle gaussien s'applique aux rejets de gaz neutres ou passifs. Le produit rejeté doit donc avoir : une densité à peu près égale à celle de l'air (ou bien il est très dilué) ; une température identique à celle de l'air et une vitesse initiale relative nulle. Il existe cependant des gaussiens " améliorés " qui savent prendre en compte les mécanismes supplémentaires de dépôts de particules et les fumées d'incendie.

La diffusion moléculaire est négligée devant la diffusion turbulente, la vitesse du vent doit donc être d'au moins 1 à 2 m/s. Dans la plupart des cas, le champ de vent est uniforme avec un profil vertical constant.

La turbulence atmosphérique est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité. Elle est prise homogène et isotrope.

Le terrain doit être homogène et plat. En effet, la présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...) introduirait des perturbations importantes de l'écoulement de l'air qui ne sont pas pris en compte par ces modèles. En pratique, les résultats sont valables pour des distances supérieures au moins à 100 m depuis le point de rejet, les modèles gaussiens n'ayant pas été validés dans la première centaine de mètres.

Par ailleurs, au-delà de la dizaine de kilomètres, les résultats présentent plus d'incertitudes car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés.

#### **3.1.3. Limites et écueils à éviter**

Il faut rappeler que les modèles gaussiens s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. De fait, la qualité de ce type de modèle est conditionné par les éléments suivants :

- La direction et la vitesse du vent doit être constante,
- Pas de présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...),
- Le nuage ne doit pas être trop éloigné du sol,
- Distances en général supérieures à 100 m et inférieures à 10 km.

## 3.2. Modèles intégraux

### 3.2.1. Généralités

L'emploi d'un modèle intégral permet de modéliser les mécanismes physiques suivants qui ne peuvent être considérés avec un modèle gaussien :

- les effets de la dynamique des rejets à même d'engendrer une turbulence spécifique, pour les rejets sous forme de jet à grande vitesse d'émission ;
- les effets de gravité, pour les rejets de gaz lourds ;
- les effets de flottabilité pour les rejets de gaz légers.

Ce type de modèle est basé sur des équations de la mécanique des fluides simplifiées pour permettre une résolution rapide. Cette simplification se traduit par l'introduction de paramètres représentant globalement les mécanismes non modélisés. A cet effet, les coefficients des modèles intégraux sont " calés " sur des expérimentations. Pour la modélisation des nuages de gaz passifs, l'outil intégral utilise un modèle gaussien.

Les modèles intégraux comprennent, dans la plupart des cas, un module de calcul permettant de déterminer **de façon plus ou moins forfaitaire** le terme source de rejet en fonction des conditions de stockage du produit et du type de rejet (rupture guillotine, ruine du réservoir, évaporation de flaque...).

*Information : Les logiciels PHAST, GALON, CAMEO, EFFECTS (TNO)... sont des modèles de type intégral.*

### 3.2.2. Domaine de validité

Ce type de modèle s'applique aux gaz neutres, aux gaz denses et parfois aux gaz légers (pour les versions les plus récentes des logiciels). La turbulence atmosphérique est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité atmosphérique, pour éviter une modélisation lourde de la turbulence.

Le terrain est supposé homogène et idéalement plat afin de ne pas introduire des perturbations complexes de l'écoulement de l'air. Les caractéristiques du terrain sont définies sous la forme d'une seule hauteur de rugosité pour toute la région du rejet.

Le champ de vent est uniforme. Dans la plupart des cas, le profil vertical du vent est retenu comme constant. Des outils plus élaborés peuvent considérer la variation de la vitesse du vent, de la température de l'air et

de la densité de l'atmosphère avec l'altitude. Une couche d'inversion de température peut parfois aussi être prise en compte.

Comme pour les modèles gaussiens, au-delà de la dizaine de kilomètres, les résultats ne sont plus valables car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés.

### **3.2.3. Limites et écueils à éviter**

Outre les limitations citées précédemment pour les modèles gaussiens, le choix et l'établissement des paramètres utilisés pour simplifier les équations de la mécanique des fluides conditionnent la qualité de ce modèle. Un inconvénient majeur est de supposer de fait des terrains soit plats et libres, soit caractérisés par leur seule rugosité ; ceci ne permet pas de modéliser les interactions nuage / sillage d'obstacle.

Enfin, il faut souligner que des erreurs issues du code ou une mise en équation des mécanismes physiques non réaliste peuvent être masquées par l'utilisation de ces paramètres.

## **3.3. Modèles CFD tridimensionnels**

### **3.3.1. Généralités**

Les modèles numériques tri-dimensionnels (Computational Fluid Dynamics) permettent de simuler les rejets de gaz en prenant en compte l'ensemble des phénomènes intervenant de façon significative sur la dispersion, qu'ils soient liés à l'atmosphère comme la turbulence thermique, ou au site comme les obstacles ou le relief.

*Information : les logiciels Pheonics, Fluidyn Panair, CFX, Fluent, Aria risk, StarCD, FLACS... sont des modèles de type CFD 3D.*

### **3.3.2. Domaine de validité**

Ce type d'outil est basé sur la résolution des équations de la mécanique des fluides. Les simplifications des équations de la mécanique des fluides sont beaucoup moins poussées que celles effectuées dans les modèles intégraux. La validation de certains outils CFD peut nécessiter un calage empirique de quelques paramètres.

Les outils CFD tridimensionnels ont un champ d'application étendu et prennent en compte les débits variables et sources multiples.

La modélisation tridimensionnelle apporte des informations qualitatives en plus des résultats quantitatifs.

### **3.3.3. Limites et écueils à éviter**

En pratique, les outils de calcul CFD tridimensionnels ne permettent pas toujours de calculer le terme source. Le terme source doit donc être évalué avec un autre outil. Dans ce cas, les données d'entrée de ce terme source doivent être traduites le plus fidèlement possible dans l'outil de calcul CFD. Par ailleurs, la plupart des outils CFD tridimensionnels ne peuvent traiter directement les mécanismes liés à des rejets diphasiques. Dans de telles situations, c'est un terme source " équivalent " totalement gazeux qui est fourni comme donnée d'entrée, ce qui exige une bonne connaissance des mécanismes d'évolution des phases liquides lors de leur rejet accidentel et peut être une source d'erreur importante (7). L'utilisation de ce type d'outil nécessite du personnel " spécialisé ", du matériel de calcul performant et surtout des données complètes et précises dont l'acquisition est indispensable pour la modélisation. La précision dépend de la méthode de résolution (différences finies, volumes finis, éléments finis), du maillage utilisé et de la manière d'utiliser les modèles (critère d'arrêt – de convergence).

*(7) A titre d'exemple, il est contre-productif d'utiliser un modèle CFD pour modéliser une fuite de gaz liquéfié si le phénomène d'aérosols n'est pas pris en compte dans la détermination du terme source.*

### **3.4. Tableau " récapitulatif " avantages / inconvénients**

	Modèle gaussien	Modèle intégral	Modèle 3D (CFD)	Essai sur terrain	Essai sur maquette
Principaux avantages	Facilité de mise en œuvre Coût peu élevé	Facilité de mise en œuvre Coût peu élevé Densité (lourd, léger) thermique	Champ d'application étendu Débits variables Relief Rendu pédagogique excellent	Approche la plus fidèle : tous les phénomènes physiques sont pris en compte	Bonne reproduction de la géométrie et de la météo  reproductibilité
Principales difficultés	1) Conditions météorologiques qui jouent un rôle essentiel au moment d'un rejet 2) Caractéristique du terme source 3) Caractéristiques d'un éventuel jet (direction, présence d'obstacles, ...) 4) Conditions de perte de confinement 5) Débit à la brèche 6) Obstacles et même en général de relief non pris en compte / terrain plat		1) 2) 3) 4) 5) Coût élevé Difficultés de mise en œuvre, données détaillées à réunir Nécessite des compétences (coût de M.O.) Raccordement cartographique entre 2D/3D	Coût très élevé Difficultés pratiques : disponibilités d'un terrain, météo le jour de l'essai et reproductibilité des essais.	Coût très élevé
Principales limitations	conditions météorologiques moyennes  champ lointain (distance de l'ordre de 100 m à une dizaine de km de la source ) et terrain plat  aux nuages ne s'éloignant pas trop du sol (à cause du cisaillement verticaux)  aux vents de direction constante et de vitesse non nulle  à partir d'une vitesse de vent supérieure à 1 m/s	valable à condition que la concentration soit homogène à l'intérieur du nuage  champ lointain (distance de l'ordre de 20 m à une dizaine de km de la source / 0-20 m au cas pas cas)  à partir d'une vitesse de vent supérieure à 1 m/s  aux vents de direction constante et de vitesse non nulle	Dépendent de la qualité des données d'entrée liées aux conditions et aux limites du problème à traiter (topographie, profils verticaux de vents et de température, etc.).  Non prise en compte de la phase di-phasique (souvent)		Limitations pratiques du principe de similitude ⇒ corrections
Evolution prévisible	Pas d'évolution fondamentale au niveau des hypothèses  Plus large diffusion  Développement de systèmes d'alerte couplés avec des stations météorologiques	Pas d'évolution fondamentale au niveau des hypothèses  Plus large diffusion	Améliorations : modélisation physique (rejets di-phasiques), ergonomie Validation en rejet accidentel Baisse du coût : modèle, machine	Utilisation orientée plus vers la validation de modèles 3D que vers la réponse directe	Utilisation orientée plus vers la validation de modèle 3D que vers la réponse directe

## 4. Eléments d'appréciation – Lecture critique de la modélisation d'un phénomène (8) de dispersion atmosphérique

(8) Tel que défini dans le glossaire technique des risques technologiques – octobre 2005 - MEDD

### 4.1. Examiner l'état physique initial du fluide diphasique

Attention : dans le cas d'un stockage d'un gaz liquéfié sous pression, une fuite par une soupape conduit généralement à une fuite en phase vapeur mais pas systématiquement. Dans certains cas, on peut assister à une fuite de type di-phasique qui doit être prise en compte de manière spécifique [2].

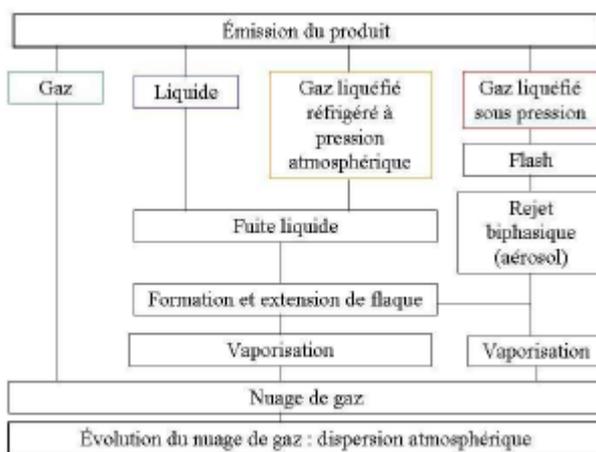


Figure 4 : Les différents états physiques et devenir de l'émission d'un produit

### 4.2. Evaluation du terme source

Il convient de s'assurer que les éléments ci-dessous ont été examinés dans la démarche retenue par l'exploitant :

- i. Quelle est la base de données qui a servi pour rentrer les caractéristiques du produit ?
  - a. Propriété physico-chimiques
  - b. Toxicité (seuils – temps d'exposition) Cf. fiche toxique FAQ
- ii. Mode de rejet : rejet instantané, continu ou à des débits variables ?
- iii. Prise en compte des reliefs et des obstacles ?
- iv. Rejets bi-phasiques / prise en compte du confinement (possible) / Diamètre de fuite maximum ? / Conditions de pression, de température, phase des fluides ?
- v. Alimentation du rejet par l'amont et l'aval de l'écoulement nominal ?
- vi. Lieu de fuite ? (très important : le mauvais positionnement de la brèche peut donner une modélisation qui n'a rien à voir !!)
- vii. Devenir de la phase liquide ?
- viii. Comportement de la fuite dans le temps ? (débit, confinement etc.)

- ix. Comportement des pompes et compresseurs en cas de perte de charge soudaine ?
- x. Durée de la fuite : possibilités d'isolement, asservissement à des vannes et temps de réponse de celles-ci et cinétique de mise en œuvre de la chaîne de sécurité (détection, alarme, action)...

### 4.3. Quid des conditions météo ?

Dans le cadre des études de dangers, les conditions de stabilité atmosphériques généralement retenues **pour des rejets au niveau du sol** sont de type D (neutre) et F (très stable) au sens de Pasquill, respectivement associées à des vitesses de vent de 5 et 3 m/s.

Dans certaines configurations de rejet et particulièrement **pour les rejets en altitude (cheminée), les conditions défavorables peuvent être différentes** de celles caractérisées par le couple (F, 3 m/s) généralement admises comme conduisant aux distances les plus pénalisantes pour les rejets à proximité du sol.

En effet, de façon succincte, lorsqu'une atmosphère est instable (classes A et B de Pasquill), la dispersion atmosphérique verticale est favorisée. Le panache qui se forme est toutefois très ouvert. En conséquence, une part importante du produit émis se disperse vers le sol. Il en résulte que, malgré l'élévation initiale, les concentrations en polluants, au sol, peuvent être importantes.

A l'opposé, lorsqu'une atmosphère est stable, son aptitude à diffuser verticalement un polluant est faible. Le panache formé reste très peu ouvert. La dispersion s'opère donc en altitude et les concentrations de polluants, au sol, sont relativement faibles.

De ce fait, pour chacun des phénomènes, les conditions météorologiques figurant ci-après peuvent être considérées :

	Stabilité atmosphérique	Vitesses du vent considérées [m/s]
Rejet horizontal au niveau du sol	D	5 (conditions médianes)
	F	3 (conditions défavorables)
Rejet vertical ou rejet de gaz léger	A	3
	B	3 et 5
	C	5 et 10
	D	5 (conditions médianes) et 10
	E	3
	F	3

## Figure 5- Conditions météorologiques retenues

Sur le territoire métropolitain, la température de l'atmosphère et du sol peut être fixée à 20°C pour les conditions de stabilité atmosphérique comprise entre A et E, et à 15°C pour la condition de stabilité atmosphérique F. L'humidité relative peut être retenue égale à 70%. En effet, sauf cas particuliers (ex : HF), l'influence de ces deux paramètres n'est pas dimensionnante pour des variations classiques. On pourra se référer à ce sujet à l'étude INERIS en référence [3].

Concernant la direction du vent, la distance obtenue est indépendante de la direction du vent pour une modélisation avec un outil intégral (c'est pourquoi dans une EDD on peut représenter facilement le résultat par un cercle de rayon la distance obtenue par calcul). Pour une modélisation utilisant un calcul CFD en revanche, la direction du vent est un paramètre important puisque à chaque direction correspond un nouveau calcul. Dans ce cas, il est pertinent de bien choisir les directions de vent pour lesquelles les calculs vont être effectués et de vérifier les raccordements entre les calculs. (cf fiche n° 5)

### 4.4. Dans quels cas est-il pertinent d'utiliser du CFD 3D ?

La dispersion atmosphérique d'un produit est influencée par l'occupation du sol, à la fois dans le champ proche avec la présence d'obstacles isolés (bâtiments industriels, lotissements...), mais aussi dans le champ lointain avec l'existence d'accidents topographiques (vallées, falaises, collines, buttes ...). Ces éléments perturbent le champ de vent de façon mécanique.

Ces perturbations sont fonction de la taille et de la forme des obstacles topographiques rencontrés par le vent. Il est important de souligner que ces perturbations vont être observées **à la fois en aval mais aussi en amont** du changement de topographie.

Lorsque les irrégularités au sol sont **de faible taille par rapport à celle du nuage**, les perturbations qu'elles engendrent, affectent de façon globale la dispersion du nuage. L'hypothèse d'un terrain idéalement plat et de rugosité uniforme est généralement bien adaptée à cette problématique. Un outil de calcul intégral peut ici être retenu.

Ceci étant, lorsque **des obstacles de la taille du nuage** existent, que le recouvrement du sol n'est pas uniforme ou que la topographie est accidentée (présence de vallée, relief accentué...), les mécanismes de dispersion sont plus complexes et spécifiques au site. Un outil de calcul de type CFD tridimensionnel semble plus approprié.

A ce stade, les modèles de calcul type CFD servent principalement à valider des concentrations en champ proche/encombré : ils doivent avant

tout servir à valider des choix techniques (ex : conception du réseau de capteurs - nombre et positionnement - d'une chaîne de détection de fuite). Pour mémoire, un calcul correspond à une direction de vent.

Dans ce cas, il importe de disposer de la part de l'exploitant des justificatifs suivants :

- des coupes verticales de la taille du nuage par rapport aux objets au niveau du sol
- raccordement graphique terrain plat/ 3D...
- choix des phénomènes dangereux pour lesquels des distances d'effets sont calculées...

#### **4.5. Justification du choix du modèle et du logiciel**

Les points suivants ont pour but de permettre à l'inspection de mener une lecture critique de la démarche menée par l'exploitant notamment lorsque celle-ci est fondée sur des outils de calcul non usuellement utilisés ou en cas de doute sur la validité de certains modèles et/ou logiciels. Le choix du type de modèle dépend de la complexité des enjeux à traiter et est fonction du but du calcul (étude des risques accidentels, des risques chroniques ou d'intervention...). Pour le choix du logiciel, les points suivants sont à vérifier :

- *Calage du logiciel* : A t-il été calé sur le produit concerné? Sur quel produit ou famille de produits a-t-il été calé ? Avec quelles expériences et type de mesures physiques, sur quels paramètres ?

- *Validation du logiciel* : Comment a-t-il été validé ? Par le retour d'expérience (connaissance d'accidents dans des conditions similaires au cas étudié) ? Par des campagnes d'essais expérimentaux (grande échelle, maquette, etc) et avec quelles mesures physiques (par des mesures réelles dans la mesure du possible et à partir d'interpolations, incertitudes liées aux protocoles et aux conditions de l'expérience et des mesures....)? Est-il possible d'obtenir des résultats des tests effectués permettant la comparaison du logiciel avec d'autres logiciels existant sur le marché ? Des grandeurs telles que la température, la vitesse ou la pression peuvent servir aux validations.

- *Etude paramétrique* : une étude de sensibilité des paramètres de calcul a t-elle été faite ? Si oui, sur quels paramètres ? Dans quelle plage de variation ?

- *Domaine de validité* :

i. Quelles sont les limites d'utilisation du modèle (vent, distance, etc) et du logiciel (résolution numérique des équations, etc) ?

ii. Quelles sont les plages d'utilisation ?

iii. Le domaine de validité du logiciel a t-il été qualifié (charte d'utilisation, formation, audit, etc.) à l'intention d'éventuels utilisateurs?

## 5. Conclusions

Les outils de calcul de dispersion atmosphérique sont des outils utiles pour l'analyse des phénomènes dangereux mais ne constituent qu'une part des éléments d'analyse. Ils doivent permettre de calculer et de visualiser les distances d'effets en tenant compte des seuils d'effets en vigueur en France et la mise en évidence des effets de synergie. Cependant, compte tenu des incertitudes liées notamment aux simplifications retenues dans les outils de calcul de dispersion et aux seuils de toxicité utilisés [3], les résultats de calcul, qui sont avant tout fonction des phénomènes dangereux représentatifs étudiés, ont une précision acceptable pour l'élaboration d'un plan d'urgence, mais demandent une application plus prudente pour la définition de règles d'urbanisme.

Il importe que le logiciel soit mis en œuvre par des personnes ayant des connaissances suffisantes des phénomènes physiques et chimiques voire toxicologiques et écotoxicologiques mis en jeu et des réalités industrielles, ceci afin de conserver un regard critique sur les étapes du calcul et le résultat final.

Par ailleurs, les hypothèses simplificatrices et les corrélations employées dans les outils les plus simples sont généralement choisies de manière à ce que ces outils soient conservatoires. On est moins assuré d'être conservatoire avec des outils de calculs plus complexes. De fait, l'utilisation d'outils de calcul de dispersion atmosphérique doit être proportionnée à la complexité des enjeux à traiter.

Par principe, moins la démarche retenue est conservatoire et plus les choix effectués doivent être explicités et justifiés (essais expérimentaux pour une substance ou une famille chimique donnée, étude paramétrique des grandeurs physiques conditionnant la dispersion atmosphérique, etc.).
--

De manière générale, il convient toujours de commencer par un modèle intégral et de voir s'il est nécessaire d'affiner. Les outils de modélisations sont un moyen parmi d'autres pour affiner, vérifier ou conforter des solutions techniques proposées ou retenues dans le cadre de la maîtrise des risques d'une installation. A titre d'exemple, la modélisation de phénomènes avec des outils CFD tridimensionnels ne saurait suffire à elle seule à justifier la réduction des distances d'effets en l'absence de démonstration technique de la réduction du risque à la source par l'exploitant.

Il est rappelé qu'au delà des résultats de la modélisation (et même en amont des calculs), c'est la compétence du modélisateur à la fois vis à vis du modèle lui-même (paramétrage...) que vis à vis des phénomènes à modéliser (type de fuites, comportement des produits etc.) qui est d'importance.

De plus, au delà de la détermination de distances d'effet, la compréhension des phénomènes qu'apporte un modèle bien utilisé permet de conforter des choix techniques sur les éléments de sécurité (rétention, capteurs, confinements etc.)

Dans le cas où il y aurait des doutes sur la validité des calculs remis par l'exploitant, un complément d'information peut lui être demandé. Une étude critique peut être éventuellement envisagée. Dans ce cas, la finalité de cette tierce expertise est de valider la pertinence de la démarche développée par l'exploitant et l'ordre de grandeur des distances d'effets issues de la modélisation.

## 6. Références

- [1] . Méthodes pour l'évaluation et prévention des risques accidentels / dispersion atmosphérique : Mécanismes et outils de calcul - décembre 2002 – INERIS - DRA 006, W - 12
- [2] . Détermination des grandeurs caractéristiques du terme source nécessaires à l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique des rejets accidentels. INERIS 2006 (bientôt disponible sur Internet).
- [3] . Estimation des incertitudes liées aux calculs des distances d'effets – Études de sensibilité et propagation d'incertitudes. INERIS 2006.
- [4] . Avis sur l'aptitude du logiciel SEVEX à la modélisation de dispersion atmosphérique – 2001- INERIS – DRA-01-30068
- [5] . " Comment estimer la dispersion des polluants gazeux dans l'atmosphère ". Etude bibliographique. Mouilleau Y.(1991). Rapport INERIS réf. EXP-YMo Z1/1
- [6] . TNO yellow book .Committee for the prevention of disasters, The Netherlands, 1997. Si la référence est donnée, elle n'en constitue cependant pas une validation des hypothèses proposées.

### **Fiche 3 : Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie**

Explosion de gaz à l'air libre (UVCE)

Indice 5 - décembre 2006

GROUPE DE TRAVAIL SECTORIEL " GPL "

Sous-groupe " modélisations "

La présente fiche a été rédigée sur la base des données scientifiques disponibles et portées à la connaissance des membres du GT sectoriel. Les

méthodes présentées reflètent un état de l'art partagé par les membres du groupe à la date d'émission de la fiche. Elles sont susceptibles d'évoluer avec le progrès des connaissances scientifiques relatives au phénomène étudié.

NB : le GT sectoriel GPL se préoccupe de la sécurité des dépôts et centres emplisseurs hors raffinerie, des adaptations sont à prévoir pour ces dernières.

## **1. Définition**

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre. Dans le cas d'un gaz inflammable, tel que les GPL, cette explosion produit :

- des effets thermiques,
- des effets de pression.

## **2. Théorie**

### **2.1 Description du phénomène**

Un UVCE comprend généralement les étapes suivantes :

- rejet dans l'atmosphère d'un GPL, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide,
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- de manière concomitante, dilution et transport du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- inflammation de ce nuage,
- propagation d'un front de flamme des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit à la manière d'un piston sur les gaz frais environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne, appelée déflagration, si sa vitesse de propagation est suffisante,
- enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Le vocabulaire distingue, selon les effets produits, l'UVCE du Flash fire, ou Feu de nuage. De manière générale, le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés, alors que le terme Flash fire est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression. Cependant il s'agit dans les deux cas du même phénomène physique, à savoir la combustion d'un mélange gazeux inflammable.

### **2.2. Accélération des flammes et effets de pression**

Lors d'une déflagration, plusieurs régimes de combustion des gaz sont susceptibles d'être observés successivement au cours du temps. La situation expérimentale suivante permet d'expliquer les mécanismes de production des effets de pression lors d'un UVCE. Il s'agit bien sûr d'un exemple, les configurations industrielles peuvent être beaucoup plus complexes, mais les mécanismes physiques mis en jeu sont les mêmes.

On considère un volume inflammable de forme hémisphérique, initialement au repos, dans lequel sont disposés des obstacles. Une source d'inflammation est placée au sol, au centre de l'hémisphère (image n° 1).

Juste après l'inflammation, le régime de combustion des gaz est généralement laminaire et un front de flamme se développe sphériquement autour du point d'allumage (image n° 2). Ce front de flamme est lisse et caractérisé par une épaisseur relativement faible (de l'ordre de 0,1 mm) de sorte qu'il peut être assimilé à une interface réactive transformant le mélange gazeux inflammable (gaz frais) en gaz brûlés. Ces derniers ont une densité moindre (d'un facteur 8 environ dans le cas des mélanges GPL-air) que le mélange gazeux initial, si bien qu'il s'ensuit une brusque expansion volumique, capable de mettre en mouvement les gaz frais, situés en aval, devant les flammes. Ces dernières agissent comme un piston sur les gaz réactifs et provoquent leur écoulement (images n° 3 et n° 4).

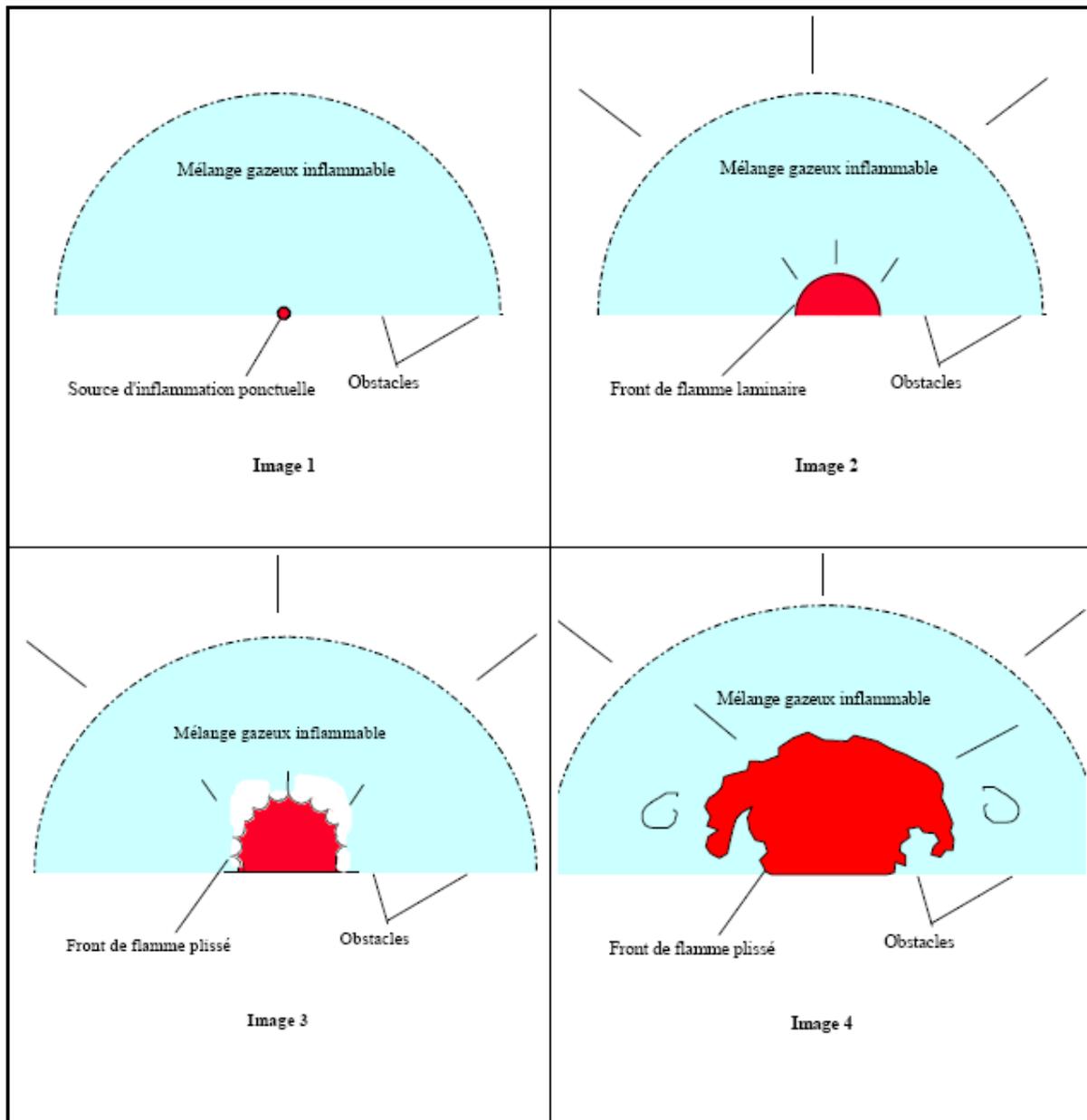
Tant que le régime de combustion est laminaire, la vitesse relative du front de flamme par rapport au gaz frais, appelée vitesse fondamentale de combustion est de l'ordre de 0,5 m/s pour des mélanges propane-air ou butane-air.

La vitesse absolue (dans un repère fixe) du front de flamme correspond dans ce cas au rapport d'expansion des gaz multiplié par la vitesse fondamentale de combustion et est donc de l'ordre de quelques m/s.

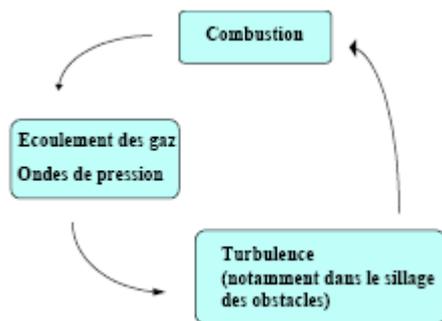
Un front de flamme laminaire est très sensible aux perturbations de son environnement : variation de la vitesse des gaz, interaction avec des ondes de pression, variation locale de la concentration du mélange... Rapidement, la flamme prend une structure plissée et instable (image 3), ce qui a pour effet d'accroître la surface de flamme, donc la consommation des gaz frais, la production de gaz brûlés et la vitesse du front de flamme. Le frottement du fluide sur des parois ou son interaction avec des obstacles induit de la turbulence dans l'écoulement, ce qui accentue encore ce phénomène (image 4). En retour, cette accélération augmente la vitesse d'écoulement des gaz frais et le niveau de turbulence de l'écoulement. Ainsi, par ce mécanisme auto-entretenu, la flamme s'accélère d'elle-même : il s'agit du régime de déflagration.

La présence d'un confinement partiel (mur, auvent, etc...) peut accentuer la montée en pression en bloquant l'expansion volumique des gaz dans une ou plusieurs directions.

### Mécanismes d'accélération d'une flamme par les instabilités de flamme et la turbulence



### Mécanisme d'accélération des flammes par la turbulence en régime de déflagration



La flamme ne peut toutefois s'accélérer indéfiniment. Lorsque le régime de déflagration devient suffisamment rapide, l'onde de choc qui se forme en avant du front de flamme peut comprimer le mélange de gaz frais jusqu'à sa température d'auto-inflammation. Si tel est le cas, il peut se former derrière l'onde de pression une zone de combustion qui se propage à la même vitesse. La zone de combustion " entretient " l'onde en compensant son atténuation naturelle, tandis que l'onde " entretient " la flamme par auto-inflammation : il s'agit du régime de **détonation**. En pratique, la transition vers la détonation peut se produire dès lors que la vitesse de la flamme devient comparable à la vitesse du son dans les gaz brûlés, soit au moins 500 m/s. Elle s'observe en général pour des vitesses de flamme de l'ordre de 2000 m/s. Dans le cas d'un UVCE de GPL, la détonation est exceptionnelle. Le régime d'explosion à retenir est celui de la **déflagration**.

### 3. Descriptions des effets

Les effets générés par un UVCE sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a lieu : conditions du mélange gazeux et conditions de l'environnement.

Paramètres propres au mélange gazeux	Paramètres propres à l'environnement
Réactivité (vitesse fondamentale de combustion, taux d'expansion)	Source d'inflammation (position par rapport au nuage, énergie)
Concentration et homogénéité	Encombrement (nombre, position, taille des obstacles)
Turbulence propre du jet	Confinement partiel

#### 3.1. Effets thermiques

L'expérience montre qu'en pratique, les effets thermiques de l'UVCE ne sont pas dus au rayonnement thermique (très court) du nuage enflammé, mais uniquement au passage du front de flamme. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours de la flamme est susceptible de subir l'effet létal, mais celui-ci n'excède pas la limite extrême atteinte par le front de flamme. Ainsi, l'effet thermique de l'UVCE ou du Flash Fire

(rappelons qu'il s'agit du même phénomène physique) sur l'homme est dimensionné par la distance à la LII (1).

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie, ou être suivi d'un feu torche, dont les effets thermiques sont à redouter.

(1) LII : *Limite Inférieure d'Inflammabilité*

### **3.2. Effets de surpression**

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde de choc dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacles.

## **4. Causes – Réalités physiques**

### **Les causes d'un UVCE**

Pour obtenir un UVCE il faut deux conditions réalisées simultanément :

- un nuage de gaz inflammable,
- une source d'inflammation.

Tous les scénarios de rupture de canalisation ou de fuite d'un GPL peuvent engendrer un UVCE. La fuite peut être liquide ou gazeuse, mais à conditions de fuite équivalentes (pression, température, section de fuite), une fuite en phase liquide produit des nuages inflammables toujours beaucoup plus grands qu'une fuite en phase gazeuse, car le débit rejeté est beaucoup plus élevé (pour les GPL dans des conditions ambiantes, 1 litre de phase liquide engendre de l'ordre de 250 litres de phase gazeuse).

### **Remarques sur la formation du nuage inflammable :**

La formation et la dispersion du nuage inflammable sont influencées par de nombreux phénomènes, qui ne sont pas toujours pris en compte dans les modèles :

- **Forme de la brèche** : la forme de la brèche a une influence sur la forme du jet. Ainsi une fuite sur un plan de joint (bride) engendre un jet " plan ", dont le développement est différent du jet " bâton " formé par exemple par la rupture guillotine d'un piquage. La forme de la brèche a donc une influence directe sur le volume inflammable formé, qui n'est pas prise en compte par les modèles de calcul de terme source. Les méthodes habituellement utilisées consistent à calculer un diamètre de fuite équivalent et à assimiler le rejet à un jet " bâton ". Cette approche devrait être conservatoire, car un jet plan devrait plutôt avoir tendance à favoriser la dilution et donc à diminuer les volumes inflammables. On manque néanmoins de données expérimentales sur le sujet.

- **Direction du rejet** : la direction du rejet (verticale, horizontale), de même que sa hauteur par rapport au sol ont une influence non négligeable sur la formation du nuage inflammable. De manière générale, la dilution est plus rapide pour un jet vertical que pour un jet horizontal, et pour un rejet en hauteur que pour un rejet au sol. Par conséquent, la distance à la LII est généralement maximale lorsque le jet se produit horizontalement au niveau du sol. Enfin, un rejet en hauteur présente généralement moins de risques, car la plupart des cibles et des sources d'inflammation potentielles sont situées au sol.

- **Impact du jet** : On parle de jet impactant lorsque le rejet rencontre un obstacle sur sa trajectoire, à proximité du point de fuite. Dans le cas d'un **jet impactant**, l'expérience montre que le volume inflammable formé pourrait être plusieurs fois supérieur à celui formé en jet libre, à conditions de fuite (diamètre de la brèche, pression) identiques. Cet accroissement de volume est produit par les phénomènes de déflexion et de re-circulation induits par les obstacles proches du point de fuite. Une analyse au cas par cas, en fonction de la taille, de la position des obstacles et de la quantité de mouvement du rejet, est nécessaire pour donner une estimation du volume inflammable à prendre en compte pour le calcul d'explosion.

- L'impact du jet sur un obstacle perturbe fortement la dispersion par rapport à une situation de champ libre, et pourrait conduire soit à une augmentation, soit à une diminution de la distance à la LII. Une étude au cas par cas, éventuellement par une simulation tridimensionnelle, est nécessaire.

- Les données expérimentales pour le butane et le propane montrent qu'en cas de fuite sur la phase liquide, **il n'y a quasiment pas de formation de flaque au sol** si le rejet n'est pas impactant. Il n'y a donc pas de calcul d'évaporation de flaque.

- En régime permanent (c'est à dire lorsque la fuite est alimentée avec un débit constant), le volume inflammable et la distance à la LII ne dépendent pas de la quantité rejetée, ni de la durée du rejet. Dans le cas d'un jet sous pression, le régime permanent peut être atteint rapidement (souvent moins d'une minute).

C'est pourquoi les mesures de sécurité destinées à réduire le temps de fuite ne se traduisent pas toujours par une réduction des distances d'effet dans les résultats donnés par les modèles de calcul, si la durée de la fuite reste supérieure à la durée d'établissement du régime permanent. Cependant, ces mesures vont bien entendu dans le sens de la sécurité, car elles permettent de réduire considérablement **le temps de présence du nuage inflammable**, et donc **le risque d'inflammation**. Enfin, en cas de feu torche, la limitation de la durée de fuite permet souvent de réduire les distances d'effet, et limite l'agression thermique sur les structures, donc le risque d'effet domino.

- La distance à la LII ne peut pas être plus grande que celle atteinte en régime établi.

- Dans le cas d'une fuite établie, on observe généralement une diminution rapide du débit, due à une chute de la température dans la canalisation. Cette chute de débit s'ajoute à celle induite par la vaporisation partielle du liquide dans le canalisation avant la brèche (phénomène de flash).

- **Conditions météorologiques** : L'influence de la stabilité atmosphérique et de la vitesse du vent sur la formation des nuages est complexe, car plusieurs mécanismes physiques entrent en compétition.

Néanmoins, on peut dégager quelques tendances générales :

- les volumes inflammables les plus grands sont généralement produits lorsque l'atmosphère est très stable, car la dilution est faible ;

- la vitesse du vent entraîne deux effets contraires : un vent fort favorise la dilution, donc la réduction du volume inflammable, mais peut entraîner le nuage à des distances plus élevées par advection.

- Lors d'un rejet de GPL, le nuage visible, dû à la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, n'a aucun rapport avec la distance à la LII. Selon le taux d'humidité de l'air, le nuage visible est tantôt plus petit, tantôt plus grand que le nuage inflammable.

## 5. Modélisation des effets

<p>En premier lieu, il est important de rappeler que les méthodes de calculs présentées ne permettent pas d'obtenir plus que des ordres de grandeur, sur lesquels la marge d'erreur n'est généralement pas quantifiable mais peut être relativement importante. Les effets modélisés (thermiques et suppression) sont ceux générés par <b>l'extension maximale du nuage au</b></p>
--

**moment de l'inflammation.** Le point d'inflammation ressort de **l'analyse de risque.**

Le calcul d'un scénario d'explosion d'un nuage est réalisé en plusieurs temps :

- détermination du **terme source**,
- un calcul de **dispersion** du nuage inflammable,
- un calcul d'**explosion**.

Les distances d'effets sont déduites du calcul de dispersion (effets thermiques) et du calcul d'explosion (effets de pression).

## 5.1. Calcul du terme source

### 5.1.1. Paramètres à définir

Quantité rejetée	Diamètre de la brèche
Phase rejetée (gazeuse ou liquide)	Hauteur de liquide par rapport à la brèche
Température	Longueur de canalisation
Pression	Direction du rejet : horizontal, vertical, impactant ou non
Durée de la fuite	Hauteur du rejet
Composition du produit	Pertes de charge

Le calcul prend également en compte les propriétés thermophysiques du produit. Pour la densité, les valeurs à retenir sont celles du Comité Français du Butane et du Propane (sur le site [www.cfbp.fr](http://www.cfbp.fr)), qui fournit les tables et les courbes de variation de la densité en fonction de la température. Les valeurs de densité dans les conditions ambiantes sont indiquées dans le tableau suivant.

<b>Propane</b>	<b>Butane</b>
515 kg/m <sup>3</sup> à 15°C	585 kg/m <sup>3</sup> à 15°C
508 kg/m <sup>3</sup> à 20°C	579 kg/m <sup>3</sup> à 20°C

Le choix d'une valeur de densité à 15°C ou 20°C a une influence minime sur les distances d'effet calculées (moins de 5%)

### 5.1.2. Hypothèses de calcul

Le calcul de la formation et de la dispersion d'un nuage inflammable fait intervenir un grand nombre d'hypothèses de calcul liées à la définition du scénario, dont certaines sont liées aux caractéristiques de la fuite, et d'autres à l'environnement du rejet. **Le choix des hypothèses faites doit être justifié explicitement par l'analyse des risques.**

De manière générale, dans les cas de la rupture d'une tuyauterie, l'hypothèse majorante consiste à considérer les deux rejets dans le même sens et à additionner les débits. Cette hypothèse conservatrice est sans doute peu représentative de la réalité dans la plupart des cas, mais on ne dispose pas aujourd'hui de modèle conservatif plus précis décrivant la forme d'un nuage alimenté par deux fuites de sens opposés.. Deux cas peuvent se présenter :

- les deux contributions sont alimentées (par exemple, lors de la rupture d'un bras de chargement en cours de dépotage si aucune barrière de sécurité n'est prise en compte : l'amont est alimenté par la vidange du camion, l'aval est alimenté par la vidange du réservoir) ;
- une seule contribution est alimentée, l'autre correspondant à la vidange d'un tronçon de canalisation.

Dans ce cas, la durée de fuite des deux contributions peut être très différente. A noter que le débit de dépressurisation d'une canalisation est variable dans le temps, et peut-être calculé par tronçon.

Autant que possible (données disponibles, possibilité des outils de modélisation), on prendra en compte les pertes de charge générées par les différents équipements présents le long des canalisations (coudes, vannes, clapets internes, clapets de rupture...).

En cas d'arrachement de bras sur un poste de transfert " camion ", la contribution du camion à la fuite est modélisée à partir de l'arrière du camion dans son axe longitudinal.

En cas d'arrachement de bras sur un poste de transfert " wagon " la contribution du wagon à la fuite est modélisée perpendiculairement au wagon dans le prolongement du piquage.

La fuite sur bride est modélisée par une fuite de dimension " épaisseur du joint x largeur du secteur angulaire défini par deux boulons successifs ".

## **5.2. Dispersion du nuage de gaz**

Le calcul de dispersion est généralement réalisé avec un logiciel de dispersion atmosphérique, par exemple PHAST (développé par DNV), FRED (développé par SHELL), SIGMA (développé par l'IRSN)... Les modèles de dispersion peuvent différer d'un code à l'autre, ce qui peut être source d'écart dans les résultats. Néanmoins, les hypothèses de départ restent semblables.

### **5.2.1. Paramètres à définir**

Le calcul de la dispersion du nuage fait intervenir des paramètres liées aux conditions extérieures, comme l'état atmosphérique et l'environnement du rejet.

**Les conditions météorologiques** sont généralement définies par trois paramètres :

- la stabilité atmosphérique,
- la vitesse du vent,
- la température ambiante.

La stabilité atmosphérique est souvent décrite à l'aide des classes de stabilité de Pasquill. On distingue 6 classes allant des atmosphères très instables (A,B), aux atmosphères très stables (E,F), en passant par des atmosphères neutres (C, D). Il existe cependant d'autres systèmes de classification comme celle de Doury qui ne définit que deux classes : les classes de diffusion normale (DN) qui regroupent les classes A à D de Pasquill et les classes de diffusion faible (DF) qui regroupent les classes E et F de Pasquill.

De plus certaines conditions de stabilité ne sont pas compatibles avec certaines vitesses de vent. Le tableau qui suit donne un exemple de la compatibilité des classes de stabilité de Pasquill avec certaines conditions météorologiques.

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 7/8	<3/8
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

**Pour ces raisons, il est recommandé, a minima, de calculer les scénarios dans les conditions météorologiques suivantes :**

D, 5, 20	F, 3, 15
Atmosphère neutre	Atmosphère très stable
Vitesse du vent, à une altitude de 10 mètres, égale à 5 m/s	Vitesse du vent, à une altitude de 10 mètres, égale à 3 m/s
Température ambiante égale à 20°C	Température ambiante égale à 15°C

**Environnement du rejet** : Les obstacles et les accidents topographiques perturbent la trajectoire du vent et modifient les caractéristiques moyennes et turbulentes de l'écoulement de l'air. Ces modifications sont, naturellement, fonction de la taille et de la forme des obstacles topographiques rencontrés par le vent. Les logiciels utilisant des modèles intégraux ne permettent pas de prendre en compte le relief, ni la présence

d'obstacles à la dispersion des nuages (bâtiments), et supposent une direction et un profil de vent constants dans le temps. Lorsque les irrégularités au sol sont de faible taille par rapport à celle du nuage, les perturbations qu'elles engendrent, affectent de façon globale la dispersion du nuage. L'hypothèse d'un terrain idéalement plat et de rugosité uniforme est généralement bien adaptée à cette problématique.

La rugosité peut être interprétée comme un coefficient de frottement du nuage sur le sol, et produit deux types d'effets antagonistes :

- elle augmente la turbulence, ce qui favorise la dilution,
- elle freine le nuage, ce qui favorise l'effet d'accumulation et la concentration.

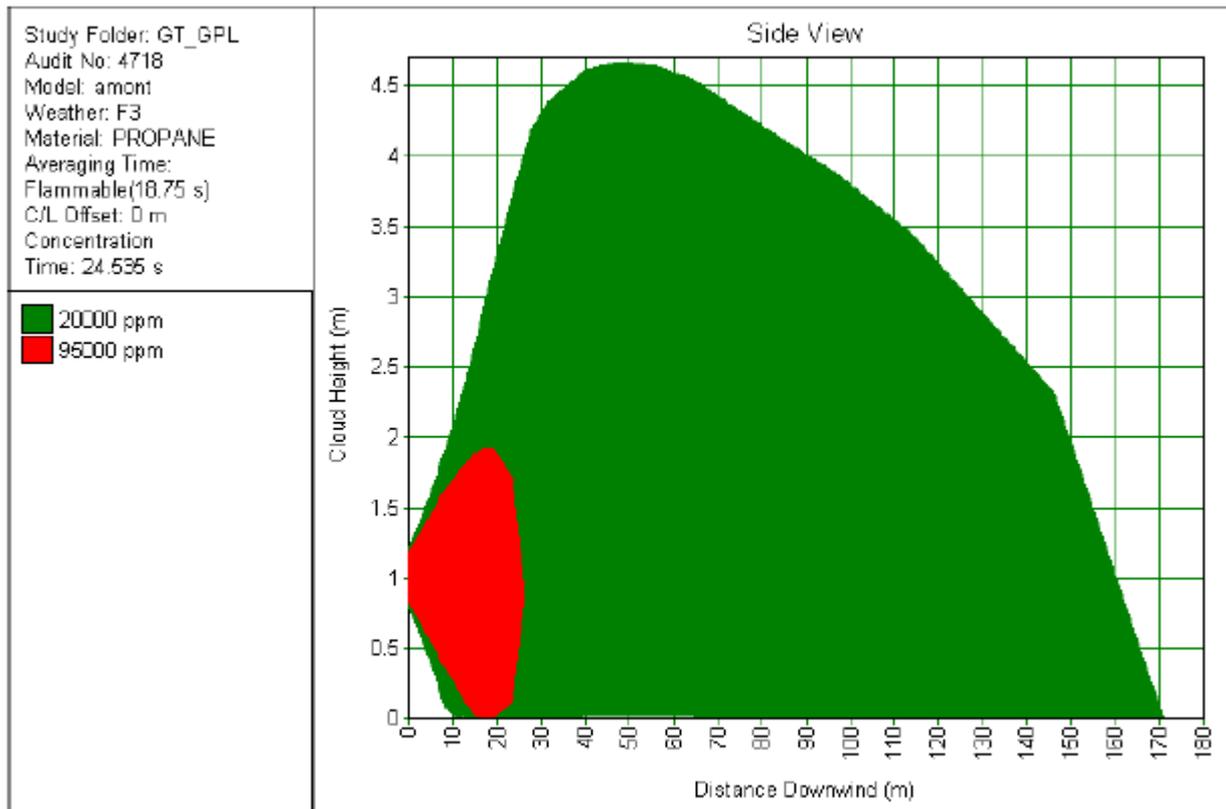
La rugosité varie selon le type d'environnement : champs, habitat dispersé, environnement industriel ou urbain ...

La rugosité a une influence non négligeable sur la dispersion des nuages de GPL, car ceux-ci ont un comportement de "gaz rampant " au sol, du fait de leur densité plus élevée que celle de l'air.

### 5.2.2. Résultats :

Le calcul de dispersion permet d'obtenir trois types de résultats :

- la distance maximale atteinte par le nuage inflammable à sa limite inférieure d'inflammabilité, ou **distance à la LII**,
- la masse de GPL contenue dans le nuage inflammable (ou **masse inflammable**) : en théorie, il s'agit de la masse de GPL dont la concentration est comprise entre la LII et la LSI (2). En pratique, l'expérience montre que les parties du nuage initialement trop riches en combustible se diluent pendant l'expansion volumétrique du nuage et brûlent également. Il est donc préférable d'évaluer la quantité inflammable à partir de la masse de GPL de concentration supérieure à la LII, sachant que la quantité initialement trop riche ne représente que quelques % de la quantité initialement comprise entre la LII et la LSI.
- la forme du nuage, en particulier sa largeur et sa hauteur. A titre d'exemple, la figure suivante montre le profil d'un nuage inflammable formé suite à un rejet horizontal de propane à 1 m au-dessus du sol. Le domaine en vert représente le champ de concentration compris entre la LII et la LSI, le domaine en rouge représente le champ de concentration supérieur à la LSI.



La distance à la LII représente le rayon maximal, compté à partir du point de fuite, qui peut être atteint par le **nuage inflammable**. Cela ne signifie pas pour autant que le nuage inflammable recouvre la surface du cercle délimité par la distance à la LII, mais qu'il **prend la forme d'un panache inflammable dont la longueur est au maximum égale à la distance à la LII**.

(2) LSI : Limite supérieure d'inflammabilité

### 5.3. Explosion du nuage de gaz – Effets de pression

Il existe plusieurs méthodes de calcul des effets de pression d'un UVCE, pour la plupart basées sur le concept Multienergy.

Parmi les plus couramment utilisées on trouve :

- la méthode Multi-energy (TNO)
- la méthode CAM (Congestion Assessment Method, Shell)
- la méthode de Baker-Strehlow.

L'idée centrale de ces méthodes est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement, et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de la flamme sont minimes. Pour une situation réelle où la dimension maximum du nuage explosif a été préalablement

estimée, on repère les endroits où la densité d'obstacles ou le degré de turbulence du nuage sont susceptibles d'être importants et on modélise l'explosion globale par une succession d'impulsions de pression engendrées par la propagation de la flamme à travers ces zones. En fait, tout se passe comme s'il n'y avait pas une, mais plusieurs explosions. On associe à chaque explosion " élémentaire " un indice de violence (sur une échelle de 1 à 10 pour la méthode Multi-Energy) qui représente la surpression maximum qui peut être obtenue dans la zone associée. Outre ces considérations géométriques la réactivité propre du gaz inflammable doit être prise en considération.

Les distances d'effets calculées ne sont pas liées directement à la quantité de produit rejeté, ni au volume des nuages inflammables formés, mais bien au volume des zones d'encombrement et de confinement. Aussi, des scénarios différents, mettant en jeu des débits de fuite et des quantités de produits différents conduisent aux mêmes distances d'effets si les nuages inflammables formés couvrent les mêmes zones encombrées.

**Les méthodes basées sur l'équivalent TNT sont inadaptées au calcul des effets d'un UVCE**, et ne sont pas forcément majorantes (Mouilleau et Lechaudel, 1999). Pour mémoire, elles sont à la base des formules de l'Arrêté Ministériel du 9 novembre 1989 pour le calcul des distances d'isolement autour des réservoirs sous talus.

L'application de la méthode Multi-énergie ou d'une méthode équivalente (CAM, Baker Strehlow) qui prend en compte les zones en champ libre et les zones encombrées est recommandée

Les avantages et inconvénients de ces diverses méthodes sont comparées par exemple dans la référence (Mouilleau et Lechaudel, 1999), téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)

### 5.3.1. Détermination de l'énergie d'explosion

#### 5.3.1.1. Propriétés de combustion du produit

L'énergie de l'explosion est liée :

- à la chaleur de combustion du gaz,
- au volume inflammable considéré.

	<b>Propane</b>	<b>Butane</b>
<b>Energie de combustion</b>	46 MJ/kg *	45,9 MJ/kg *
	3,46 MJ/m3 **	3,48 MJ/m3 **
<b>Limites d'inflammabilité (% vol)</b>	2,1 % - 9,5 %	1,3 % - 8,5 %
<b>Concentration stœchiométrique</b>	4,0 %	3,1 %

\* par kg de produit \*\* par m<sup>3</sup> de mélange stœchiométrique

### 5.3.1.2. Calcul du volume inflammable en champ libre

Le calcul de dispersion permet de déterminer la masse de GPL contenue dans le nuage inflammable.

Toutefois, il ne permet pas de déterminer le volume de nuage dont la concentration est comprise entre la LII et la LSI. La concentration dans le nuage est variable ; il y a des gradients, avec des zones de concentration supérieure à la concentration stœchiométrique, et d'autres de concentration inférieure.

**En moyenne, considérer que toute la masse inflammable est diluée à la concentration stœchiométrique permet de calculer le volume inflammable avec une bonne approximation.**

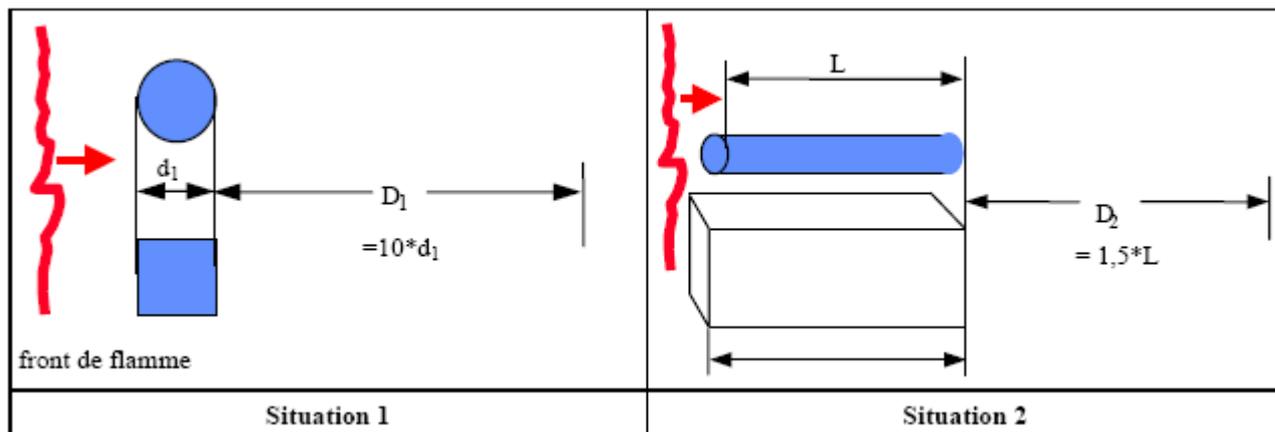
On a ainsi :  $V_{inf} = M_{inf} / (\rho_{gaz} \cdot C)$  où C est la concentration volumique de gaz dans le nuage.

En champ libre, la masse réagissant à considérer pour la suite de la modélisation est celle que le nuage aurait s'il avait atteint son expansion maximale (masse à la LII).

### 5.3.1.3. Détermination des zones encombrées indépendantes

On dispose des quelques critères simples suivants, proposés par le TNO, pour déterminer les zones encombrées " indépendantes " au sens de la méthode Multi-Energy :

- Deux obstacles appartiennent à une même zone si la distance qui les sépare est inférieure à 10 fois la plus petite dimension orientée perpendiculairement à la direction des flammes (situation 1), ou 1,5 fois la dimension orientée parallèlement à l'obstacle (situation 2). Par exemple, dans la situation 1 où la flamme se propage perpendiculairement à l'axe d'un obstacle cylindrique, la plus petite dimension perpendiculaire à la direction des flammes est le diamètre du cylindre



- Deux zones séparées par plus de 25 m sont indépendantes.

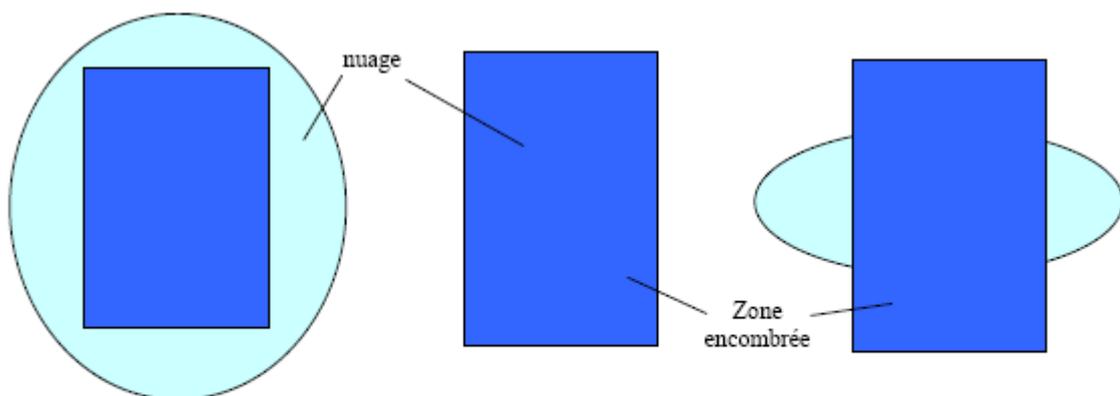
En général, la détermination des zones encombrées est assez intuitive. Sur un site GPL, il s'agit principalement :

- des postes de chargement et déchargement,
- des pomperies,
- des stockages de bouteilles,
- des zones de stationnement de camions et de wagons.

Le volume des zones encombrées est calculé en retranchant le volume des obstacles. Le taux d'encombrement est souvent difficile à estimer, mais il est en général plus faible que l'intuition le laisserait supposer. A titre indicatif, le taux d'encombrement d'un casier de bouteilles est de 30 à 35%.

#### 5.3.1.4. Détermination du volume inflammable dans la zone encombrée

Il s'agit dans cette étape de superposer le profil du nuage inflammable à la cartographie des zones encombrées.



Le nuage recouvre totalement la zone encombrée :  
 $V_{\text{infi}} = V_{\text{encombrée}}$

Le nuage est contenu dans la zone encombrée :  
 $V_{\text{infi}} = V_{\text{nuage}}$

Le nuage recouvre partiellement la zone encombrée :  
 $V_{\text{infi}} = V_{\text{encombrée recouvert par le nuage}}$

Cette comparaison doit également être effectuée dans la hauteur. Les obstacles ne sont pris en compte que sur la hauteur du nuage.

La précision requise sur le calcul du volume inflammable est assez relative. Comme il intervient à la puissance 1/3 dans le calcul de la surpression, un écart de 10% sur le volume inflammable induit une erreur d'environ 3% sur le calcul de la distance à un seuil de surpression donnée.

### 5.3.1.5. Calcul de l'énergie d'explosion

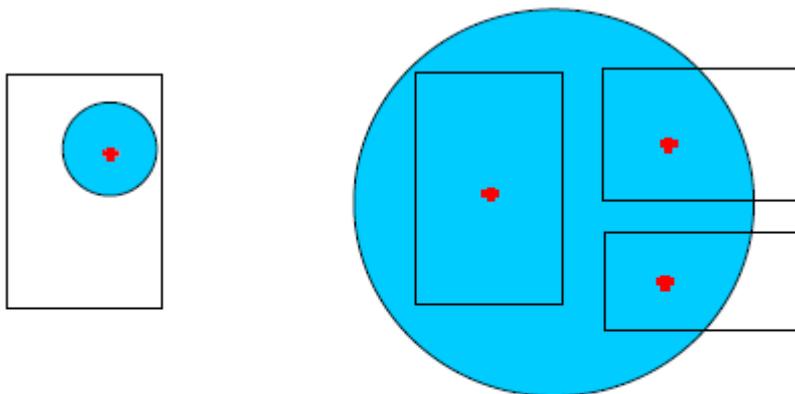
Une fois déterminé le volume inflammable à considérer dans chaque zone encombrée, l'énergie de chacune des explosions élémentaire est aisément calculée en multipliant le volume inflammable par la chaleur de combustion du gaz considéré.

### 5.3.2. Identification du centre de l'explosion

L'identification du centre de l'explosion est une étape primordiale, car c'est à partir de ce point que sont comptées les distances d'effet. Il est donc **impératif que pour chaque nuage de gaz pouvant exploser, l'étude indique les coordonnées du centre de l'explosion et la distance d'effets à partir de ce centre.**

Explosions dans des zones encombrées :

Deux cas se présentent :



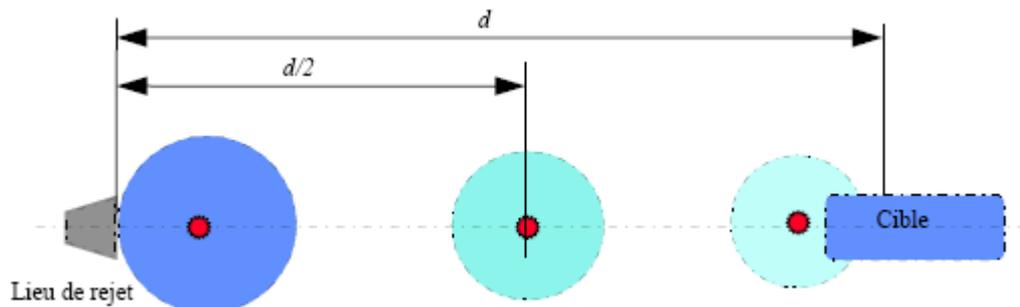
*Cas 1 : le nuage est contenu dans la zone encombrée :  
Centre d'explosion = centre du nuage*

*Cas 2 : le nuage couvre totalement ou partiellement plusieurs zones encombrées :  
Centres d'explosion = centre de chaque zone encombrée, ou centre de la partie encombrée recouverte par le nuage*

**Dans le cas d'une explosion en champ libre**, la totalité de la masse inflammable doit être considérée, et les deux situations suivantes peuvent se présenter.

**Cas des nuages dérivant en champ libre :**

Lors d'un rejet massif de produit pendant une durée très courte (ruine de réservoir, ou jet transitoire sous pression), il se forme un nuage dérivant, dont le volume inflammable diminue au fur et à mesure du déplacement du nuage. On suppose que le nuage dérive en champ libre c'est à dire qu'il ne rencontre pas d'obstacle à sa dispersion, ni de zone encombrée qui favoriserait une explosion violente.

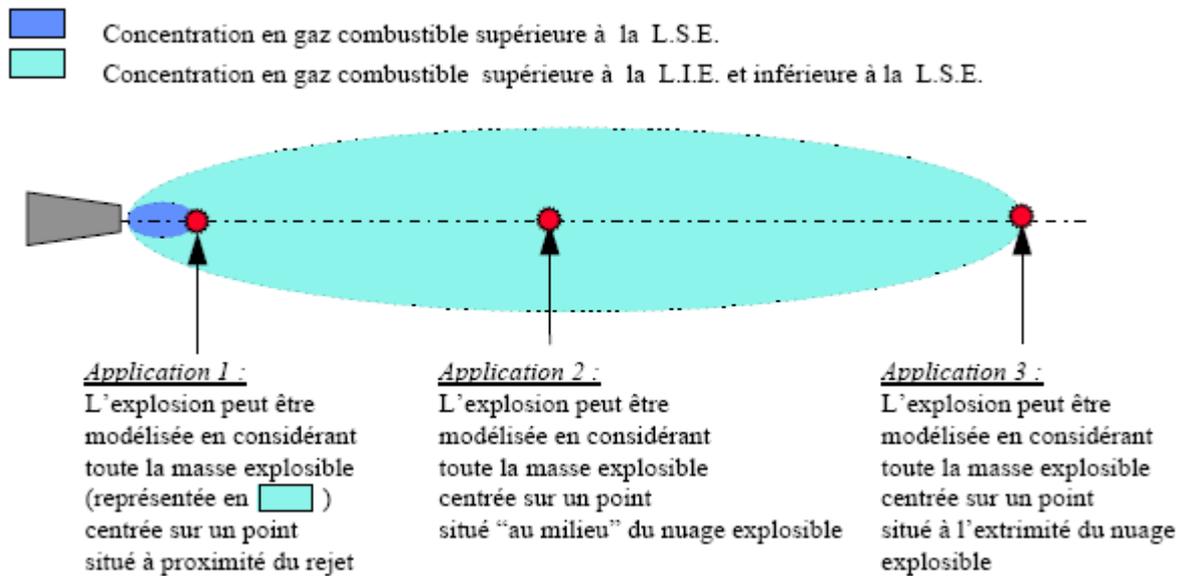


Situation 1	Situation 2	Situation 3
Inflammation à proximité immédiate du rejet	Inflammation au cours de la dérive du nuage	Inflammation à la distance à la LII
Volume inflammable maximum	Volume inflammable intermédiaire	Volume inflammable minimum
Turbulence du jet élevée	Turbulence du jet atténuée	Turbulence atmosphérique
Surpression maximale dans le nuage de l'ordre de 100 mbar	Surpression maximale dans le nuage de l'ordre de 50 mbar	Surpression maximale dans le nuage de l'ordre de 20 mbar
Explosion loin de la cible	Explosion à mi-distance entre la source et la cible	Explosion proche de la cible

Les trois situations méritent d'être étudiées, sans qu'il soit possible de déterminer a priori la plus pénalisante. Dans la situation 1, le volume inflammable est important et la surpression maximale élevée, mais l'explosion se produit loin de la cible, si bien que l'effet de pression sur cette cible peut être de faible ampleur. A l'opposé, dans la situation 3, le volume inflammable a beaucoup diminué, la surpression maximale est faible car le nuage est peu turbulent, mais l'explosion se produit au niveau de la cible. Tout dépend, dans ces cas, de l'éloignement de la cible et du seuil d'effet étudié.

### Cas des fuites alimentées en champ libre :

Dans le cas des jets sous pression en régime permanent, le nuage inflammable prend la forme d'un ellipsoïde très allongé.

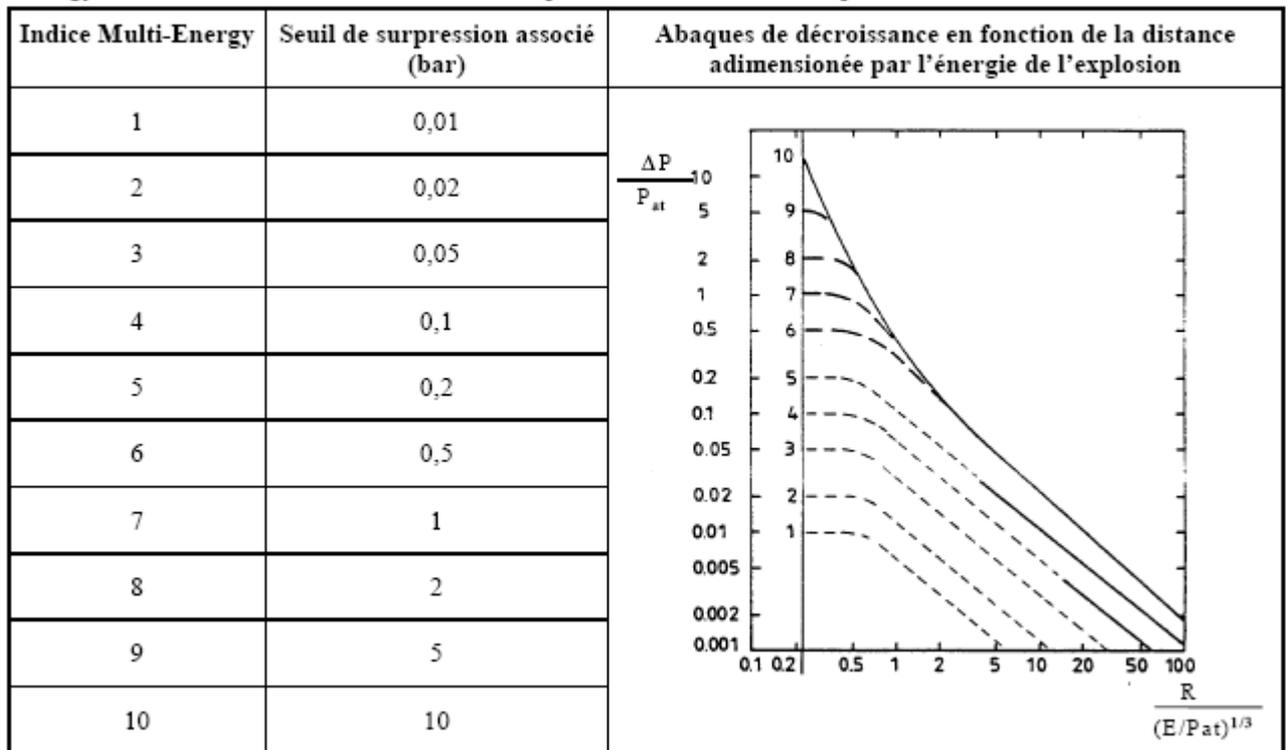


L'application 3 correspond au cas où le nuage rencontre une source d'inflammation préexistante à sa dispersion.

Toutefois, la surpression produite dans une telle situation est peu élevée car la propagation du front de flamme n'est pas sphérique. Du point de vue des effets, les résultats expérimentaux disponibles montrent que la situation 2 est la plus pénalisante. Elle est susceptible de se produire lorsque une source d'inflammation transitoire apparaît dans le nuage après sa formation. L'application 2 est donc préconisée : centre de l'explosion positionné à une  $\frac{1}{2}$  distance " point de fuite – point d'inflammation ".

### Choix d'un indice de violence

L'indice de violence correspond au niveau de surpression maximal produit par l'explosion. A chaque indice de violence est associée une courbe de décroissance des surpressions aériennes. Dans le cas de la méthode Multi-Energy, les indices sont notés de 1 à 10, et correspondent aux niveaux de surpression suivants :



Les courbes d'indice supérieur ou égal à 6 sont confondues pour les niveaux de pression inférieurs à 0,2 bar.

Le niveau de surpression maximal est directement lié à la vitesse de flamme atteinte lors de la combustion du nuage.

En théorie, il suffirait de calculer cette vitesse de flamme pour déterminer précisément l'indice de violence à retenir.

En pratique, ce calcul est difficile à effectuer, car il dépend de plusieurs paramètres :

- la réactivité propre du gaz,
- la turbulence propre du jet,
- la densité d'obstacles présents sur le parcours de la flamme,
- l'énergie de la source d'inflammation.

Pour un site GPL, l'INERIS et l'IRSN s'accordent pour retenir les ordres de grandeur suivants :

Nature du volume inflammable	Ordre de grandeur de la surpression maximale*
Nuage quasiment au repos en champ libre	< 20 mbar (1)
Jet turbulent en champ libre	50 à 100 mbar (2) selon la puissance du jet
Casiers de bouteilles	500 – 1000 mbar (3)
Pomperie	100 – 500 mbar selon la configuration
Zones de stationnement de camions ou de wagons	100 – 500 mbar (4) selon la configuration

\* il s'agit de la surpression maximale dans le volume inflammable déterminé au § 5.3.1.4.

**Ces règles sont purement indicatives, car la violence de l'explosion dépend autant de l'encombrement de la zone que de la turbulence initiale du jet. Une analyse au cas par cas est nécessaire.**

Les ordres de grandeurs proposés sont déduits des données expérimentales suivantes :

- 1- Lannoy A. et al. (1989) : Déflagration sans turbulence en espace libre : expérimentation et modélisation. EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série A n°1, pp.1-13.
- 2- Stock M., Schumann S., Wirkner-Bott I. (1992), 7th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries ; Taormina, Italy, 4-8 May 1992 (Paper N°. 36).
- 3- Mercx W.P.M.(1993), Modelling and experimental research into gas explosions, Overall Final report of the MERGE project, CEC contract : STEP - CT - 0111 (SSMA).
- 4- Lechaudel J.F. and Mouilleau Y. (1995) :Assessment of an accidental vapour cloud explosion - A case study : Saint Herblain, October the 7th 1991, France, Proceedings of the 8 th International Loss Prevention Symposium, pp 333-348, Antwerp, Belgium.

### **5.3.2.1. Cas particulier des halls d'emplissage**

En toute rigueur, les explosions dans les halls d'emplissage de grands volumes inflammables (consécutifs, par exemple, à la pénétration d'un nuage formé à l'extérieur) ne peuvent être traitées avec une méthode du type Multienergy, car il s'agit d'explosions confinées, et non d'UVCE. Les effets de pression dans l'environnement sont induits par l'éclatement du bâtiment, et non directement par l'énergie de combustion mise en jeu. Néanmoins, les halls d'emplissage sont généralement des structures légères, dans lesquelles les brèches apparaissent rapidement, si bien qu'une grande partie du nuage initialement présent à l'intérieur brûle à l'extérieur, à la manière d'un UVCE.

Aussi, en première approche, une méthode du type Multi-energy pourrait être utilisée, en considérant un indice de violence de 6, justifié par les vitesses de flamme élevées observées dans ce type d'explosion. Néanmoins, un calcul plus précis ne peut se faire qu'après une étude de la résistance de la structure, et avec un modèle d'explosion en enceinte fermée.

## **5.4. Explosion et inflammation du nuage de gaz – Effets thermiques**

L'expérience montre que l'effet du rayonnement thermique est assez limité, et que l'effet léthal est dimensionné par la distance à LII. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours des gaz brûlés est susceptible de subir l'effet léthal avec une probabilité élevée, et toute personne se trouvant en dehors du nuage inflammable ne peut pas subir d'effet thermique léthal.

Dans le cas de l'explosion d'un nuage de gaz au repos en espace libre ou flash fire les seuils d'effets thermiques considérés sont :

- distance au seuil des effets létaux significatifs = distance à la LII
- distance au seuil des premiers effets létaux = distance à la LII
- distance à l'effet irréversible =  $1,1 \times$  distance à la LII (formule forfaitaire).

Toutefois, lorsque un nuage inflammable sort d'un site, il est nécessaire d'étudier l'environnement voisin pour identifier la présence de sources d'inflammation éventuelles. En particulier, si dans certaines directions il est démontré que la possibilité que le nuage rencontre une source d'inflammation avant d'atteindre la distance maximale à la LII est très forte, la distance aux effets thermiques dans cette direction peut être réduite à la distance entre le point de fuite et le point d'inflammation.

On ne dispose pas de seuils d'effets thermiques sur les structures associés aux phénomènes rayonnants de courte durée. De manière générale, on peut considérer qu'il y a un risque de propagation d'un incendie aux matériaux combustibles (en particulier le bois). Dans le cas des matériaux incombustibles (cas de la plupart des structures et équipements industriels), le risque serait limité à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères.

## **5.5. Modèles CFD tridimensionnels**

Les méthodes présentées dans cette fiche permettent de traiter la plupart des situations industrielles avec un niveau de précision suffisant au regard de leur rapidité de mise en œuvre et des enjeux associés à la détermination des distances d'effets. Toutefois, ces méthodes restent relativement forfaitaires et ne prennent en compte que très partiellement les effets directionnels de la dispersion et de l'explosion. Lorsque ceux-ci se manifestent au premier ordre (en raison de la présence d'obstacles ou d'un relief accidenté) et que les enjeux le requièrent, les modèles CFD (3) offrent une alternative intéressante, aussi bien pour la caractérisation des nuages inflammables (dispersion, taille, volume, localisation) que pour la détermination des vitesses de flammes et des champs de pression. Divers outils sont disponibles :

- en dispersion atmosphérique : PHOENIX, FLUENT, CFX, FLACS...
- en combustion/propagation d'ondes de pression : FLACS, AUTOREAGAS, EXSIM, ...

Ces modèles calculent, pas à pas dans le temps et dans l'espace, l'évolution des paramètres physiques comme la concentration, la vitesse de l'écoulement, la température, la pression, etc... Une prise en compte assez fine du relief et des obstacles est donc possible.

Cependant, les coûts et délais encore élevés de mise en œuvre de ces logiciels limitent leur utilisation systématique dans les études réglementaires. Un bon niveau d'expertise est également requis pour interpréter les résultats, s'assurer de leur représentativité physique et surtout de leur aspect conservatif. Pour le moment, ils restent donc limités à des utilisations au cas par cas.

*(3) Computational Fluid Dynamics*

## **5.6. Références**

MOUILLEAU Y. et LECHAUDEL JF, 1999 : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre, Rapport INERIS, téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).

Exemple de calcul des effets d'un UVCE

L'exemple qui suit illustre les principales règles et hypothèses de calcul proposées dans cette fiche. Toutefois, il ne prétend pas couvrir toutes les situations susceptibles d'être rencontrées dans l'industrie. Il est purement fictif, et basé sur l'application de la méthode Multi-Energy.

Hypothèses : On considère un rejet accidentel de propane suite à la rupture guillotiné d'une canalisation de liquide.

Le rejet est supposé libre, horizontal, à 1 m au-dessus du sol, et la durée de fuite est de 15 minutes. Ces hypothèses définissent le scénario, elles sont issues d'une analyse de risques.

On suppose également que la fuite est alimentée d'un côté par la vidange d'une capacité (contribution " amont "), de l'autre uniquement par la dépressurisation d'un tronçon de canalisation (contribution " aval ").

### **1. Calcul du terme source**

Un calcul de débit est réalisé pour les contributions " amont " et " aval ". Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

<b>Contributions</b>		<b>Amont</b>	<b>Aval</b>
Débit massique du rejet (kg/s)	[kg/s]	29.2	35
Vitesse finale du rejet (m/s)	[m/s]	180	180
Durée du rejet (s)	[s]	900	4
Fraction liquide	-	0.69	0.69

La contribution aval prend la forme d'un relâchement de produit de très courte durée, assimilable à une bouffée.

Dans ce cas, le calcul de dispersion montre que cette bouffée initiale n'a pas d'incidence sur la masse inflammable formée. Elle peut être négligée.

## **2. Calcul de la formation et de la dispersion du nuage de gaz**

Le calcul est réalisé avec un logiciel de dispersion atmosphérique en champ libre. Il permet, à partir des caractéristiques du terme source de déterminer la forme et les dimensions du nuage, ainsi que la masse de propane dont la concentration est au-dessus de la LII. Il est effectué avec les conditions météorologiques de Pasquill (F, 3) et (D, 5).

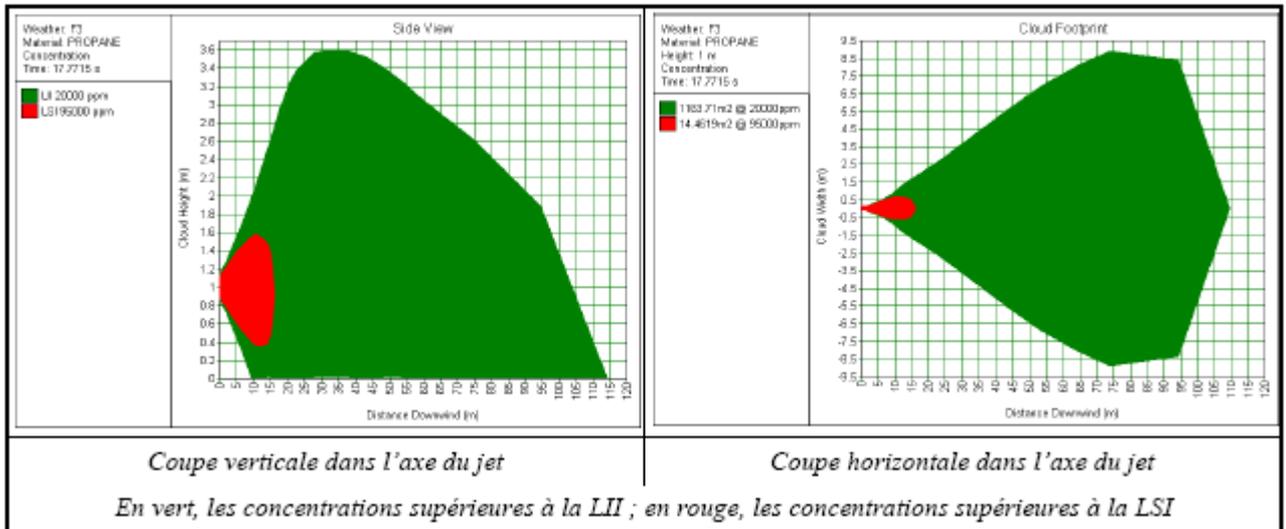
**Les principaux résultats de calcul sont présentés dans le tableau suivant :**

<b>Conditions météorologiques</b>	<b>(F, 3)</b>	<b>(D, 5)</b>
Distance à la LII (m)	115	120
Masse inflammable (kg)	160	100
Volume inflammable dans les proportions stœchiométriques (m3)	2175	1340

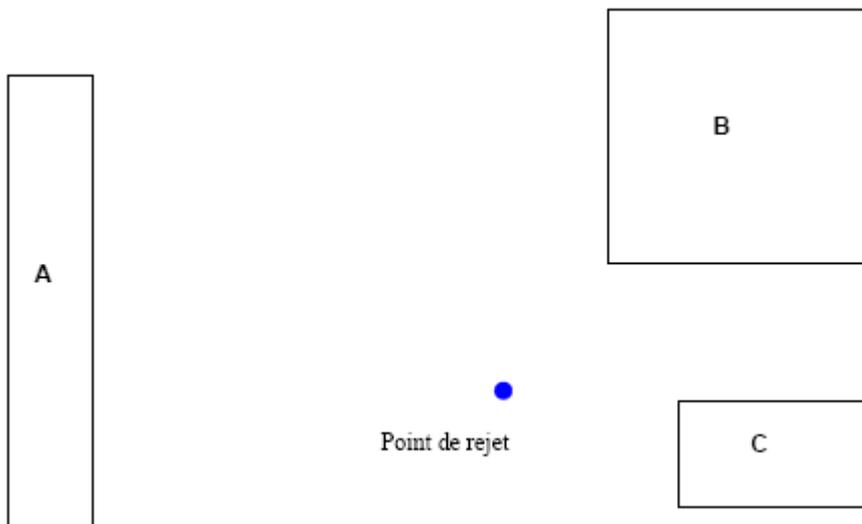
Dans la suite, le calcul détaillé d'explosion en zone encombré est exposé dans les conditions (F,3) uniquement. La démarche de calcul serait identique dans les conditions (D,5).

Le nuage inflammable prend la forme d'un panache dont les dimensions maximales sont les suivantes dans les conditions (F, 3) :

Longueur maximale : 115 m Largeur maximale : 18 m Hauteur maximale : 4 m



### 3. Détermination des zones encombrées indépendantes



Les zones A, B, C ont pour dimensions respectives :

Zone	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume total (m <sup>3</sup> )	Taux d'encombrement	Volume libre (m <sup>3</sup> )	Distance du point de rejet au centre de la zone (m)
A	30	5	4	600	10%	560	50
B	15	15	6	1350	15%	1150	40
C	10	7	7	490	30%	354	30

On suppose que ces trois zones peuvent être considérées comme des zones encombrées indépendantes au sens de la méthode Multi-energy, d'après les critères définis au § 5.3.

#### 4. Détermination des volumes inflammables dans chaque zone encombrée

En superposant le profil du nuage au " plan " des zones encombrées, on détermine les zones encombrées susceptibles d'être recouvertes, totalement ou partiellement, par le nuage inflammable. Dans cet exemple, les trois zones A, B et C sont situées à une distance inférieure à la distance à la LII, elles peuvent donc être atteintes par le nuage inflammable.

Cependant, en raison de la forme en panache du nuage, il est peu probable qu'il atteigne en même temps plusieurs zones encombrées. Les zones recouvertes dépendent de la direction dans laquelle se développe le panache, et de la direction du vent. On peut aussi imaginer que la gaz se disperse dans un espace libre d'obstacles, par exemple entre les zones A et B. Ce cas doit être étudié également.

Pour chaque zone encombrée, le volume inflammable est limité au volume encombré effectivement recouvert par le nuage, déterminé en comparant les dimensions respectives du nuage et de la zone encombrée.

Ainsi, les zones B et C sont plus hautes que la hauteur maximale du nuage, la hauteur du volume inflammable encombré correspondant est donc limitée à la hauteur du nuage

La zone A est plus large que le nuage, la largeur du volume inflammable encombré correspondant est limitée à la largeur du nuage.

Zone	Dimensions du volume inflammable dans chaque zone				Taux d'encombrement	Volume inflammable encombré (m <sup>3</sup> )
	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume total (m <sup>3</sup> )		
A	5	18	4	360	10%	324
B	15	15	4	900	15%	765
C	10	7	4	280	30%	200

#### 5. Calcul de l'énergie d'explosion

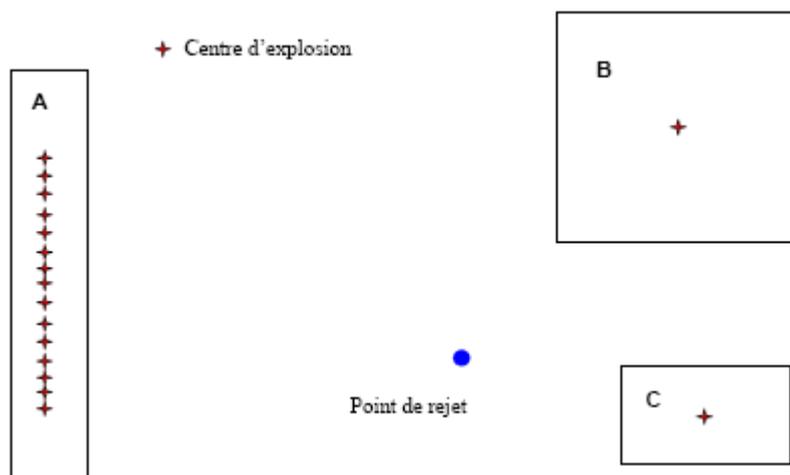
Pour chaque volume encombré, l'énergie de l'explosion est déterminée en multipliant le volume inflammable déterminé à l'étape précédente par la chaleur de combustion du propane (3,46 MJ/m<sup>3</sup> pour un mélange stoechiométrique).

Zone	Volume inflammable encombré (m3)	Energie de l'explosion (MJ)
A	324	1121
B	765	2647
C	200	692

## 6. Identification du centre de l'explosion

La procédure proposée au § 5.3.2 permet de déterminer le centre de l'explosion pour chacune des zones A, B et C.

Dans le cas des zones B et C, le nuage est susceptible de recouvrir totalement la surface occupé par la zone encombrée : le centre de l'explosion est donc situé au centre des zones encombrées. Dans le cas de la zone A, la largeur maximale du nuage est inférieure à la largeur de la zone encombrée. Le centre de l'explosion est donc situé au centre du volume inflammable. Selon la direction du jet, la partie de la zone A recouverte par le nuage inflammable peut varier. Le centre de l'explosion est donc susceptible de se déplacer dans la zone A.



## 7. Choix de l'indice de violence

On suppose que l'analyse de chaque zone encombrée conduit à retenir les indices de violence suivant :

Zone	Indice Multi-energy	Surpression maximale correspondante (mbar)
A	5	200
B	6	500
C	6	500

Le jet pourrait également se développer en champ libre, par exemple entre les zones A et B. Dans ce cas, c'est le volume inflammable total qui

est considéré (1340 m<sup>3</sup>), et nous supposons une surpression maximale de 100 mbar (indice de violence 4), en raison de la nature du jet (initialement fortement turbulent).

## 8. Calcul des effets de pression

Avec les hypothèses précédentes, l'utilisation des abaques de décroissance du § 5.3.3 permet de déterminer les distances d'effet qui suivent. Ces distances sont comptées, pour les zones A, B et C, depuis le centre de l'explosion déterminé à l'étape 6.

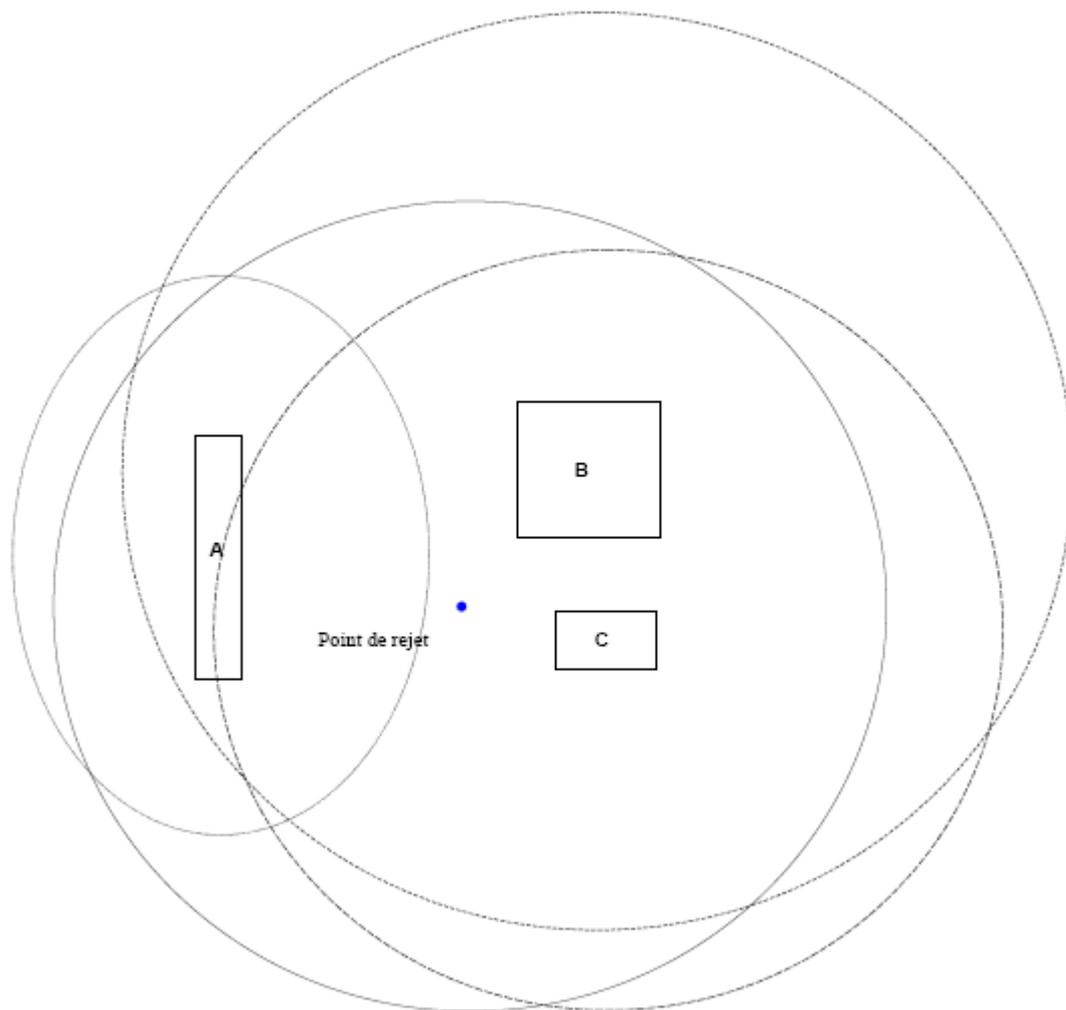
Pour l'explosion en champ libre, la distance est comptée à partir du point de fuite, en supposant que le centre de l'explosion est situé au centre du nuage inflammable, c'est à dire à la moitié de la distance à la LII. Cela revient à ajouter la moitié de la distance à la LII à la distance d'effet calculée

Zone encombrée	200 mbar	140 mbar	50 mbar
A	12 m	20 m	55 m
B	50 m	65 m	155 m
C	30 m	40 m	100 m
Explosion du nuage en champ libre	Non atteint	Non atteint	115 m*

\* 115 m = 58 m (distance d'effet) + 57 m (1/2 distance à la LII)

On notera en particulier que l'explosion dans la zone C entraîne des distances d'effet plus grandes que l'explosion dans la zone A, alors qu'elle met en jeu un volume inflammable plus petit. Ceci est dû au niveau de surpression maximal (indice de violence) associé à chaque explosion.

Il est possible de positionner ces zones sur un plan, comme ci-dessous pour les distances au seuil de 50 mbar (sur cet exemple, l'échelle n'est respectée qu'approximativement). Pour le cas particulier de l'explosion en champ libre, ce tracé en forme du cercle centré sur le point de fuite suppose qu'il n'y a pas de direction prévisible du rejet.



## 9. Effets thermiques

Les effets thermiques sur l'homme sont déterminés à partir de la distance à la LII, comme indiqué au § 5.4.

Seuil des effets létaux	Seuil des effets irréversibles
120 m	130 m

## 10. Influence du volume inflammable

A titre d'illustration, le calcul d'explosion en champ libre est effectué dans les conditions (D,5). On remarquera que pour un volume inflammable 40% plus petit que dans les conditions (F,3), la distance d'effet est presque inchangée, ce qui illustre le peu de sensibilité des distances d'effets à une incertitude sur le volume inflammable (rappelons que celui intervient à la puissance 1/3 dans les abaques de décroissance de la méthode Multi-énergie).

Conditions météorologiques	(F, 3)	(D, 5)
Distance à la LII (m)	115	120
Volume inflammable dans les proportions stœchiométriques (m3)	2175	1340
Distance au seuil de 50 mbar comptée à partir du point de fuite (= deffet + ½ dLII)	115 m (58 m + 57 m)	110 m (50 m + 60 m)

## Fiche 4 : Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie

LE BLEVE

Indice 7 de décembre 2006

GROUPE DE TRAVAIL SECTORIEL " GPL "

Sous-groupe " modélisations "

La présente fiche a été rédigée sur la base des données scientifiques disponibles et portées à la connaissance des membres du GT sectoriel. Les méthodes présentées reflètent un état de l'art partagé par les membres du groupe à la date d'émission de la fiche. Elles sont susceptibles d'évoluer avec le progrès des connaissances scientifiques relatives au phénomène étudié.

### Rappel Préliminaire

L'occurrence d'un BLEVE est liée à la rupture brutale d'un réservoir de gaz liquéfié, survenant lorsque le réservoir est soumis à une agression thermique ou mécanique. Le phénomène de BLEVE est **donc l'effet domino d'un événement précurseur** tel que l'impact d'un projectile, l'échauffement par un feu torche impactant, un surremplissage, ... .

La présente fiche ne concerne que le cas particulier des BLEVE de réservoirs contenant du GPL

### 1. Définition

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, ou Vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition.

Le BLEVE peut-être défini comme **la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un**

**liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.**

Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE. En effet, le BLEVE est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion. Aussi, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour parler de BLEVE.

Les effets d'un BLEVE sur l'environnement se manifestent généralement de trois manières :

- Effets de pression : propagation d'une onde de surpression ,
- **Effets missiles** : projection de fragments à des distances parfois très importantes,
- **Effets thermiques** : dans le cas d'un BLEVE de gaz liquéfié inflammable, rayonnement de la boule de feu.

## 2. Théorie

La théorie du BLEVE fait appel à la notion de température limite de surchauffe (TLS).

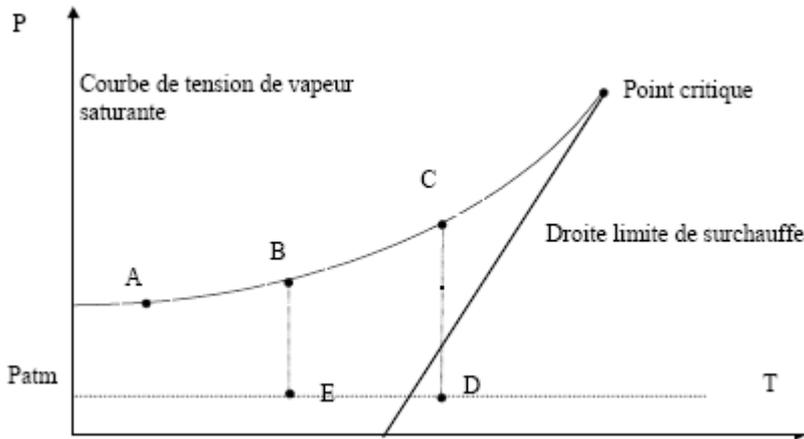
Lorsqu'on transfère, à pression donnée, de la chaleur à un liquide, celui-ci subit une augmentation de température, jusqu'à atteindre son point d'ébullition et à former des bulles de vapeur qui se développent sur les sites actifs que sont les impuretés et les interfaces avec les parois. Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation dans le liquide, le point d'ébullition peut être dépassé sans qu'il n'y ait d'ébullition. Dans ce cas, le liquide est dit surchauffé.

Il existe cependant une limite de température, à une pression donnée, au-delà de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide, même en l'absence de sites de nucléation. Cette limite est la température limite de surchauffe.

Considérons, un gaz liquéfié pur à l'équilibre thermodynamique dont l'état est présenté par le point A. Si on lui fournit de la chaleur, le point représentatif de son état se déplace sur la courbe de vapeur saturante jusqu'à rejoindre le point B. Le gaz peut alors passer, par dépressurisation brutale, à l'état représenté par le point E en restant, au moins momentanément, surchauffé, à l'état liquide avant de se vaporiser plus ou moins rapidement. En revanche, un gaz dont l'état est représenté par le point C de la courbe de tension de vapeur, qui est dépressurisé brutalement à la pression atmosphérique (point D) subit une vaporisation homogène, rapide et totale à caractère explosif, car il ne peut subsister à

l'état liquide à une température supérieure à sa température limite de surchauffe.

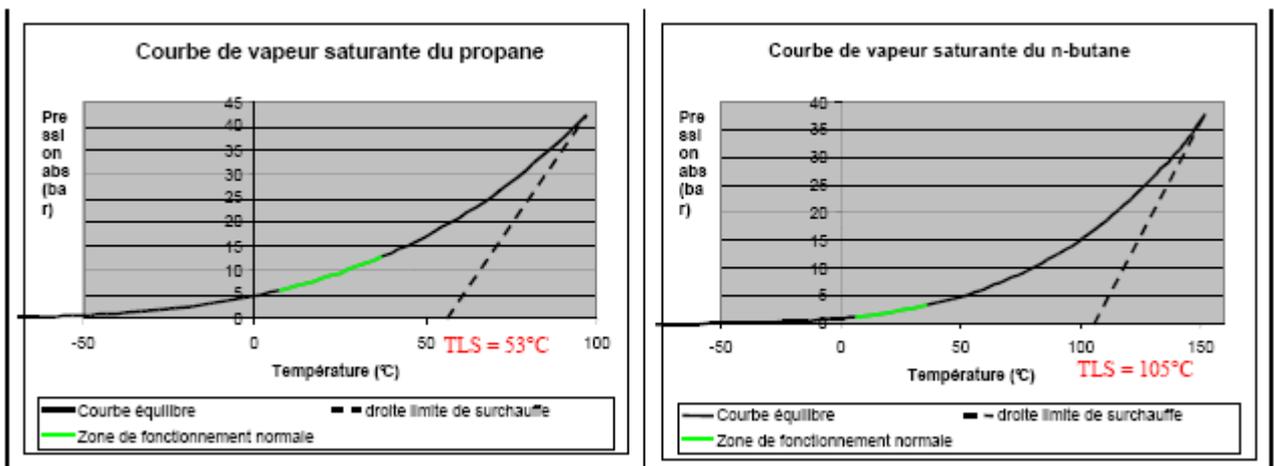
### Courbe de tension de vapeur saturante et de droite limite de surchauffe



La notion de BLEVE froid ou chaud se réfère uniquement à la température limite de surchauffe (TLS) du produit :

- la transformation B-E, qui se produit **en dessous de la température limite de surchauffe à pression atmosphérique**, est généralement appelée " **BLEVE froid** ".
- la transformation C-D, qui se produit **au-dessus de la température limite de surchauffe à pression atmosphérique**, est généralement appelée " **BLEVE chaud** ".

### Courbes de vapeur saturante et de température limite de surchauffe du propane et du butane (données issues de la base de données publiques DIPPR)

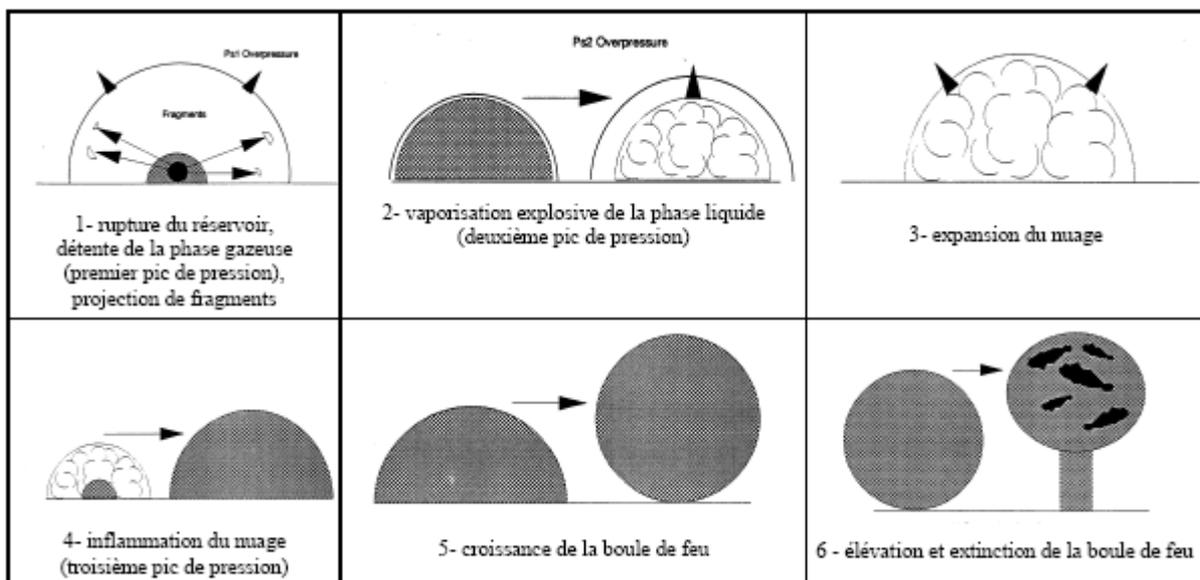


La zone dite de " fonctionnement normal " correspond aux conditions de température et de pression usuellement rencontrées en exploitation. La température de stockage impose la pression dans le réservoir : par exemple, pour le propane stocké à 20°C la pression est de 8,4 bars absolus.

Pour qu'un BLEVE chaud se produise, il faut donc que la pression d'éclatement du réservoir soit supérieure à 19,9 bars pour du propane et 17 bars pour du butane. Pour des pressions inférieures la rupture conduit à un BLEVE " froid ".

La distinction entre BLEVE " froid " et BLEVE " chaud " décrite ci-dessus est théorique. En pratique, la transition entre les deux s'effectue de manière continue. L'analyse du retour d'expérience montre qu'il est difficile de distinguer, a posteriori, un BLEVE " froid " d'un BLEVE " chaud ".

**Etapes de développement d'un BLEVE " chaud "** (d'après S. Shield, 1993)



**3. Descriptions des effets**

Les effets du BLEVE sont de trois types : thermiques, surpression et missile. D'une manière générale, les distances aux seuils d'effets de surpression (50 et 140 mbar) sont moindres que les distances aux seuils d'effets thermiques (600 et 1000 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s

.s)

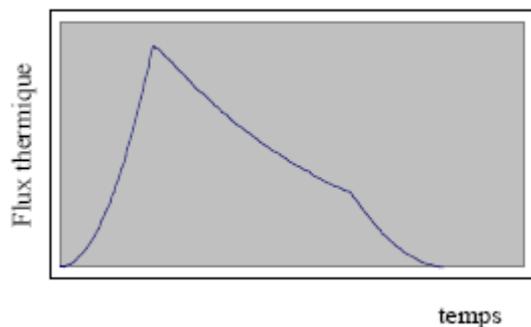
En théorie, le BLEVE " froid " engendre des effets moindres que le BLEVE " chaud " car la pression et la température de rupture sont plus basses. De

ce fait, le flash du liquide en gaz n'est pas total : une flaque de liquide peut se former au sol et engendrer un feu de nappe. Les niveaux de surpression dans l'environnement sont également plus faibles lors d'un BLEVE " froid ", et les fragments sont projetés à des distances assez courtes.

### 3.1. Effets thermiques

Les effets thermiques sont liés au rayonnement thermique de la boule de feu et, le cas échéant, de la combustion de la flaque au sol. La durée d'exposition au rayonnement, qui dépend de la composition, de la quantité et de la température du produit présent, est de courte durée (d'environ quelques secondes pour un petit camion citerne à environ quelques dizaines de secondes pour une sphère de 1.000 m<sup>3</sup>).

Le rayonnement suit la cinétique du phénomène. Pendant la phase d'inflammation du nuage et de croissance de la boule de feu, le flux thermique atteint rapidement le maximum de son intensité, pour décroître (au niveau du sol) à mesure que la boule de feu s'élève dans le ciel, avant de chuter rapidement quand la boule de feu se résorbe.



Allure du flux thermique reçu par une cible lors d'un BLEVE " chaud "

Parce que le rayonnement thermique n'est pas constant et que le phénomène est de courte durée, de l'ordre de la dizaine de seconde, les seuils thermiques utilisés pour la définition des effets létaux et irréversibles sont ceux de faible durée définis par l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation :

- seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine : 600 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s
- seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine : 1000 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s

- seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine :  $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$

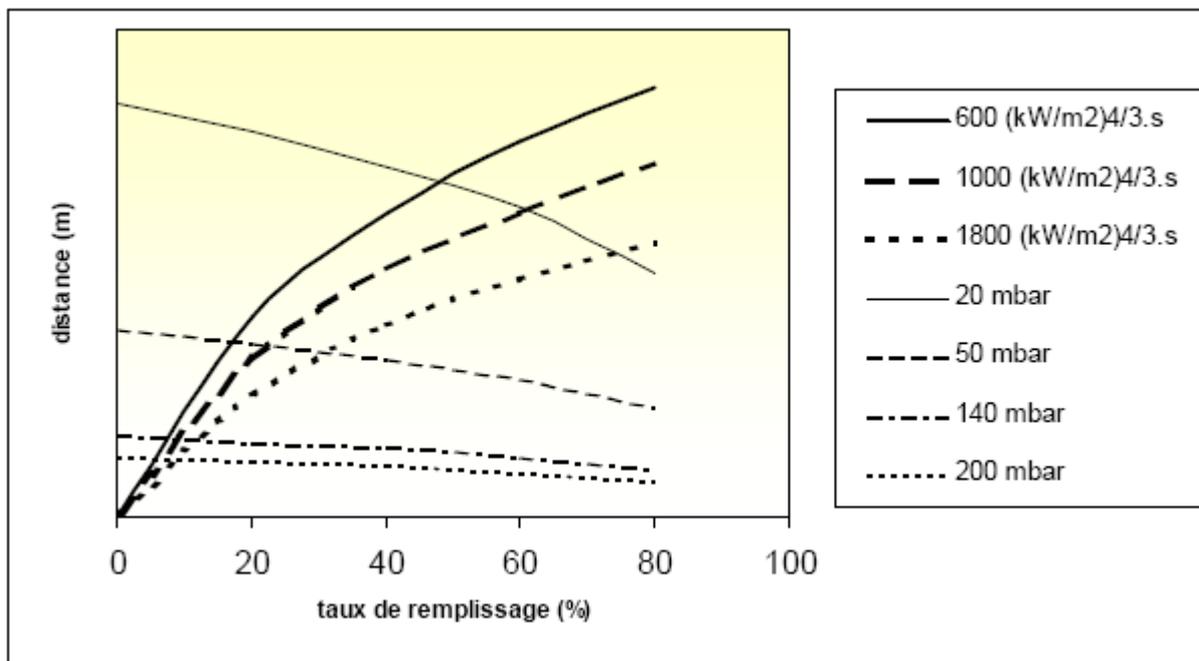
En effet dans le cas où la durée du phénomène est inférieure à 2 minutes, le calcul des distances se fait en terme de **doses thermiques** reçues exprimés en  $[(\text{kW/m}^2)^{4/3}]\cdot\text{s}$ , et non en terme de flux exprimés en  $[\text{kW/m}^2]$ .

La figure suivante représente l'allure des courbes de distances d'effet en fonction du taux de remplissage.

La position relative des courbes peut varier en fonction de la nature du produit et de la pression d'éclatement, mais de manière générale, les tendances suivantes se dégagent :

- les distances d'effet enveloppes sont données par les effets thermiques calculés pour un réservoir plein. Les distances au seuil des effets irréversibles de surpression (50 mbar) sont inférieures aux distances au seuil des effets irréversibles thermiques ( $600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$ ).
- en dessous d'un certain taux de remplissage (de l'ordre de 15 à 30% selon les conditions de rupture et la nature du produit), les effets de pression peuvent devenir majorants par rapport aux effets thermiques.

Le seuil de  $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\cdot\text{s}$  peut ne pas être atteint dans le cas de BLEVE de petits réservoirs (de l'ordre de quelques mètres cubes). Dans ce cas, la distance d'effet associée peut être prise égale au rayon de la boule de feu.

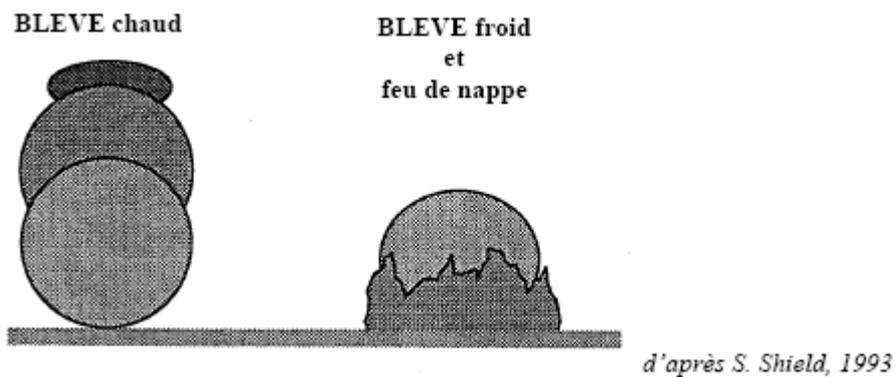


Allure de l'évolution des effets thermiques et de pression lors d'un BLEVE, en fonction du taux de remplissage

Dans le cas d'un BLEVE " froid ", les effets thermiques sont produits à la fois :

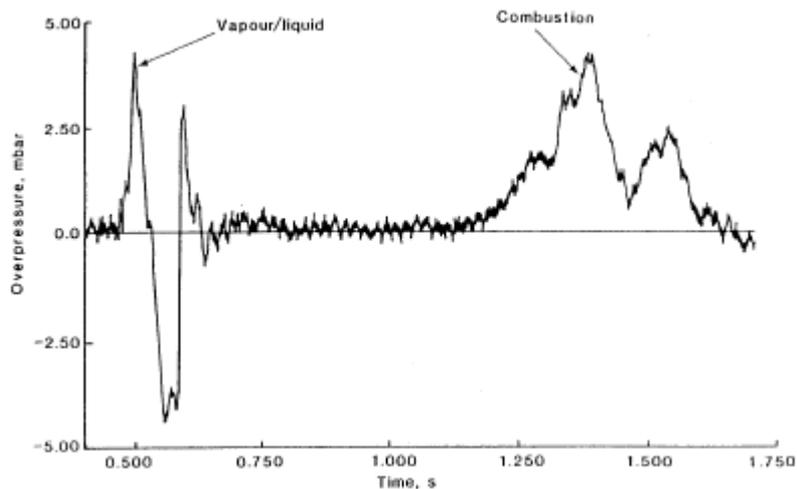
- par le rayonnement de la boule de feu (de taille plus réduite qu'en cas de BLEVE " chaud " ),
- par le rayonnement d'un feu de nappe si une flaque se forme au sol.

Le pouvoir émissif du feu de nappe étant deux à trois fois inférieur à celui de la boule de feu, on admet que les effets thermiques produit par un BLEVE " froid " sont inférieurs à ceux produits par un BLEVE " chaud ". Ce point est vérifié lors des essais expérimentaux.



### 3.2. Effets de surpression

Un enregistrement de la surpression engendrée par un BLEVE est reproduit sur la figure suivante. Ce profil typique, mentionné par de nombreux auteurs (Shield 1993, Birk 1997, etc.), met en évidence un premier pic suivi d'une phase négative prononcée, un deuxième pic rapproché d'amplitude voisine du premier, puis, plus tardivement, un troisième pic très large.



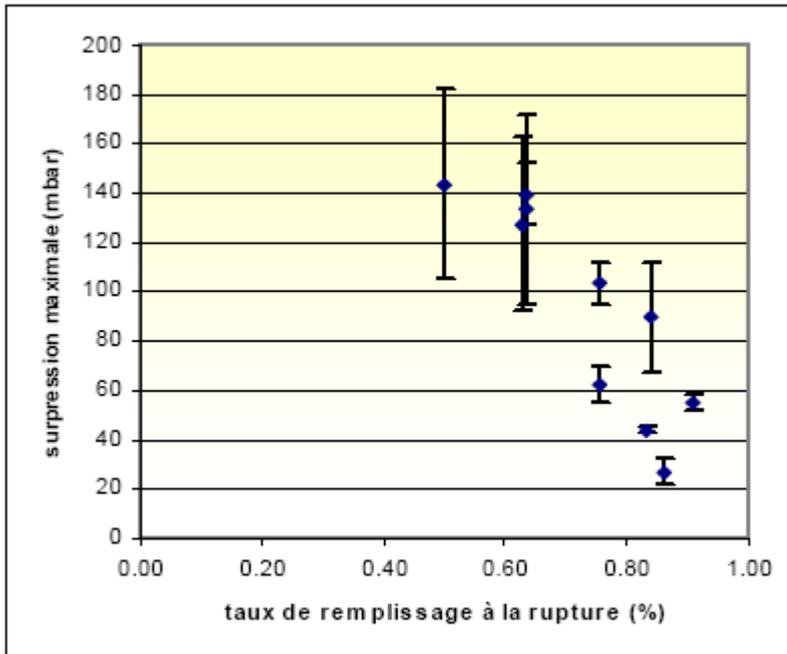
*Exemple de signal de pression enregistré lors d'un BLEVE de butane (essai British Gas, d'après S. Shield 1993)*

Le **premier pic** résulte clairement de la détente brutale de la phase gazeuse du réservoir. A l'échelle expérimentale, une corrélation peut être établie entre l'amplitude du premier pic et l'énergie de détente du ciel gazeux.

L'interprétation du **deuxième pic** est plus délicate :

- Shield l'attribue à la vaporisation explosive du liquide, et note qu'il apparaît toujours dans la phase de dépression qui suit le premier pic.
- D'autres auteurs, comme Birk, attribuent les deux premiers pics à un seul et même phénomène physique, la détente de la phase vapeur. Birk souligne que cette succession de pics de pression est également visible lors d'éclatements de réservoirs qui ne contiennent que du gaz. Il note par ailleurs une corrélation très nette entre le premier et le deuxième pic, quel que soit le taux de remplissage au moment de la rupture, ce qui suggérerait que les deux pics sont dus au même phénomène physique. De plus, ce profil typique de surpression est observé indépendamment de la température du liquide à la rupture. Or, en théorie, un pic de vaporisation du liquide ne devrait être visible que lorsque celle-ci présente un caractère explosif, c'est à dire lorsque la température du liquide est supérieure à la température de surchauffe à la pression atmosphérique.

Enfin, la surpression maximale engendrée par le BLEVE diminue lorsque le niveau de remplissage augmente, même lorsque la température du liquide est supérieure à la TLS à pression atmosphérique.



Surpression maximale engendrée par un BLEVE en fonction du taux de remplissage à la rupture – essais de Birk

**Le troisième pic** est classiquement attribué à la combustion de la boule de feu. Il est d'amplitude généralement plus faible que les deux premiers, mais sa durée est beaucoup plus longue. D'après Shield, **le pic de combustion présente les plus grands niveaux d'impulsion, et est donc responsable des dégâts aux structures**. Néanmoins, la réglementation prescrit des seuils d'effets exprimés en terme de surpression. Il est donc nécessaire de s'intéresser au niveau de surpression maximum engendré par les deux premiers pics.

La difficulté à interpréter les deux premiers pics rend difficile le choix d'un modèle physique. Toutefois, quelle que soit cette interprétation, il semble bien que l'on puisse dimensionner les effets de surpression à partir de la détente de la phase gazeuse.

Dans le cas du BLEVE " froid ", ces trois pics de pression sont également présents. Leur amplitude relative est fonction de la fraction gazeuse à la rupture et du taux de vaporisation. Néanmoins, il semble que les niveaux de pression soient assez limités, car les énergies de détente de la vapeur et de vaporisation du liquide sont d'autant plus faibles que la température est basse. Les données expérimentales disponibles à l'échelle moyenne confirment ce point.

### 3.3. Effets missiles

Les BLEVE " chauds " et les BLEVE " froids " produisent des effets missiles. Le retour d'expérience montre que lors d'un BLEVE, la rupture du réservoir produit un nombre limité de fragments, en général moins de quatre ou cinq. Des fragments peuvent être projetés à des distances très élevées (plusieurs centaines de mètres), car leur impulsion initiale, communiquée par la vaporisation quasi-instantanée du liquide, est très grande. Au moins deux BLEVE survenus sur des citernes mobiles (Kamena Vourla, Grèce, 1999 et Belleville, Canada, 2002) ont projeté le réservoir presque entier à environ 800 m. Toutefois, le retour d'expérience sur les BLEVE de citernes mobiles montre qu'environ 85 % des fragments sont projetés dans un rayon de 300 m autour du réservoir.

Dans le cas des réservoirs cylindriques, les essais et le retour d'expérience montrent que les fragments sont projetés préférentiellement selon l'axe du réservoir. La préconisation consistant à ne pas placer de cible sensible dans l'axe des réservoirs cylindriques est donc justifiée. Toutefois, on ne peut exclure la projection dans une direction perpendiculaire, car il ne s'agit que d'une répartition statistique (d'après Birk, 2/3 des fragments sont projetés dans l'axe du réservoir, et 1/3 perpendiculairement).

#### **4. Causes – Réalités physiques**

Sur un dépôt de GPL, un BLEVE peut être observé pour 5 types de réservoirs :

- BLEVE d'une sphère,
- BLEVE d'un wagon citerne,
- BLEVE d'un camion citerne,
- BLEVE d'un petit réservoir vrac (réservoir cylindrique),
- BLEVE d'une bouteille.

Les causes d'un BLEVE

Trois principales causes du BLEVE ont été identifiées, dont deux sont liées à des agressions externes :

- un impact mécanique,
- une agression thermique (feu torche ou feu de nappe)
- le surremplissage du réservoir.

Nature du réservoir	Impact mécanique	Agression thermique	Surremplissage du réservoir
Sphère	BLEVE " froid "	BLEVE " chaud " ou " froid "	BLEVE " froid "
Wagon citerne*		BLEVE " chaud "	
Camion citerne*		BLEVE " chaud "	
Réservoir petit vrac (cylindre)		BLEVE " chaud " ou " froid "	
Bouteille		BLEVE " chaud "	

\* sans soupape

**L'impact mécanique** ne peut conduire qu'à la formation d'un BLEVE " froid ", car il n'y a pas d'échauffement du réservoir qui pourrait augmenter la température du GPL contenu au-delà de la TLS.

Une **agression thermique** (feu torche, feu de nappe) peut engendrer les deux types de BLEVE, selon que la rupture se produit à une température inférieure ou supérieure à la TLS. Les conditions à la rupture dépendent en particulier de la présence ou non de soupapes. En théorie, les réservoirs sans soupape ne peuvent conduire qu'à un BLEVE " chaud ", car à la pression d'éclatement du réservoir (de l'ordre de 20 à 30 bar) la température est supérieure à la TLS. En pratique, le type de BLEVE dépend également de la mécanique de la rupture, qui est un paramètre totalement inconnu a priori.

En cas de **surremplissage du réservoir**, une montée en température entraîne la dilatation du liquide à l'intérieur, qui peut aller jusqu'à la disparition complète de la phase gazeuse : c'est le phénomène de plein hydraulique. La pression monte alors extrêmement rapidement dans le réservoir et entraîne sa rupture, mais la température peut être encore bien plus basse que la TLS à pression atmosphérique. Dans ce cas, le phénomène est un BLEVE " froid ".

## 5. Modélisation des effets

### 5.1. Effets thermiques

#### Preliminaire

Pour étudier un phénomène de BLEVE, " chaud " ou " froid ", les effets thermiques doivent être systématiquement modélisés.

En raison des difficultés à déterminer les critères d'exploitation fiables qui permettraient de s'affranchir de manière générique du BLEVE " chaud " (telle qu'une impossibilité physique de dépasser la TLS), en raison du retour d'expérience qui met en évidence l'impossibilité de déterminer de

manière fiable a posteriori si un BLEVE a été " chaud " ou " froid ", en raison de l'usage des résultats des modélisations à des fins de protection des tiers par le biais de la maîtrise de l'urbanisation et d'élaboration des plans de secours, la modélisation à considérer pour la détermination des effets thermiques du BLEVE en tant que potentiel de danger, qu'il soit " froid " ou " chaud ", est celle d'un BLEVE " chaud ". Les effets thermiques des scénarios étudiés dans l'Etude De Dangers, doivent être modélisés avec les hypothèses de calcul déterminées par l'analyse des risques.

### **Choix du modèle**

A la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, l'INERIS a comparé plusieurs modèles de calcul des effets thermiques disponibles dans la littérature (Leprette, 2002). La plupart (modèles du TNO, du CCPS) sont des modèles purement empiriques et très simples, qui permettent de déterminer, à partir de la seule connaissance de la masse de produit contenue dans le réservoir, les principales caractéristiques du BLEVE (taille et durée de vie de la boule de feu). Ils permettent, à partir d'un modèle classique de rayonnement thermique, de calculer l'effet thermique du BLEVE.

Le Centre de Recherche de SHELL (Thornton Research Centre, TRC) a développé un modèle semi-empirique plus complexe qui décrit la physique du phénomène. Ce modèle, souvent appelé modèle TRC, ou modèle de Shield, est à la base des formules de l'arrêté du 5 juin 2003 modifiant l'arrêté du 9 novembre 1989 qui fixe des distances d'isolement. Son utilisation est préconisée par le Groupe de Travail " Etudes de dangers " auprès du CSIC (avis du 10 décembre 2003). Il est également disponible dans le logiciel FRED commercialisé par SHELL.

Les distances d'isolement de l'arrêté du 9 novembre 1989 modifié se fondent sur des valeurs de  $1000 [(kW/m^2)^{4/3}] \cdot s$  pour le seuil de létalité et de  $600 [(kW/m^2)^{4/3}] \cdot s$  pour le seuil des brûlures significatives. **Ces formules réglementaires ne sont valables que pour les réservoirs munis de soupapes, en raison des hypothèses faites sur la pression d'éclatement, et pour un taux de remplissage compris entre 30 et 85%.**

### **Modèle TRC SHIELD**

Le modèle est construit à partir d'essais réalisés par British Gas dans les années 1990 sur des capacités de quelques tonnes de GPL (propane et butane). Il permet de simuler l'évolution du phénomène dans le temps, en considérant trois phases de développement de la boule de feu :

1) Phase d'inflammation du nuage et de développement de la boule de feu jusqu'à son diamètre maximal, ou phase d'expansion.

Durant cette phase, le modèle suppose une évolution linéaire du rayon et du pouvoir émissif de la boule de feu avec le temps jusqu'à leur valeur maximale.

### 2) Phase de combustion de la boule de feu.

Durant cette phase le modèle suppose :

- une décroissance linéaire de la température de la boule de feu entre sa valeur maximale et sa valeur de début d'extinction. Le modèle évalue la température finale de la boule de feu à 0,88 fois sa température maximale (cette hypothèse provient de l'observation des résultats expérimentaux) ;
- Une vitesse d'ascension de la boule de feu constante. L'absence d'accélération verticale ascendante notable s'explique dans la mesure où la boule de feu entraîne de l'air et donc se refroidit alors qu'elle s'élève. En effet, dans le cas contraire, elle devrait accélérer fortement dans la direction verticale du fait d'une différence de température importante avec l'ambiante ;
- Un rayon de la boule de feu constant lors de son ascension.

### 3) Phase d'extinction.

L'extinction de la boule de feu est supposée complète lorsque les dernières gouttes qui se sont enflammées, alors que la boule de feu était à sa température maximale (fin de la phase d'expansion), sont consumées.

Durant cette phase le modèle suppose une décroissance linéaire du rayon de la boule de feu avec le temps et un maintien de la valeur du pouvoir émissif . la boule de feu est supposée rester à l'altitude qu'elle avait à la fin de son ascension.

**Le modèle repose sur un certain nombre d'hypothèses et de relations empiriques spécifiques aux GPL (butane et propane).** C'est pourquoi son utilisation pour d'autres gaz liquéfiés est impossible de manière systématique et doit être envisagée au cas par cas.

### Paramètres d'entrée du modèle TRC Shield :

Le modèle peut être utilisé pour **des taux de remplissage compris entre 30 et 85%**.

En-dessous de 30%, l'effet de surpression peut devenir prépondérant. Il est donné par la détente de la phase gazeuse.

Dans ce cas, des modèles d'éclatement pneumatique de réservoir sont plus appropriés.

Au-dessus de 85%, le réservoir peut se rompre par plein hydraulique et donner un BLEVE " froid ".

Le groupe de travail " Etudes de dangers " auprès du CSIC s'est prononcé sur la validité du modèle TRC au travers de deux avis, le 10 décembre 2003 et le 16 juin 2004.

Paramètres liés aux conditions de stockage		Paramètres liés aux conditions ambiantes	
Paramètre	Valeurs conseillées	Paramètre	Valeurs conseillées
Nature du produit (conditionne les propriétés thermodynamiques à retenir)	Données butane et propane commercial de TRC Shield	Pression atmosphérique	1013 hPa
Volume du réservoir	Volume nominal du réservoir	Température ambiante	20 °C
Taux de remplissage	(1)	Humidité de l'air	70% HR
Pression d'éclatement	Présence ou non de soupapes (2)		

### (1) Taux de remplissage

Le taux de remplissage à prendre en compte pour la modélisation est :

- pour un réservoir utilisé à moins de 85% de sa capacité, celui dont l'atteinte génère l'arrêt du remplissage,
- pour un réservoir exploité à 85% ou plus de sa capacité, 85%. En effet ce niveau est celui qui génère l'effet maximal. Il est rappelé que les formules de l'arrêté ministériel du 9 novembre 1989 modifié le 5 juin 2003 sont des modèles simplifiés qui ne sont pas valables pour des taux de remplissage supérieurs à 85%.

### (2) Pression d'éclatement

Le choix de la pression d'éclatement dépend du type de réservoir étudié. Les essais réalisés sur des capacités de quelques mètres cubes munies de soupapes montrent que la rupture survient à une pression égale à la pression de tarage des soupapes. Dans le cas des réservoirs sans soupape, la rupture se produit à une pression plus élevée, proche de la pression d'épreuve des réservoirs. Les formules du 5 juin 2003 sont établies pour une pression d'éclatement égale à la pression de tarage des soupapes usuellement rencontrées sur les sites. Elles ne sont donc pas applicables aux réservoirs mobiles qui sont dépourvus de soupape.

Néanmoins, la prise en compte des soupapes suppose que toutes les conditions garantissant leur bon fonctionnement sont réunies. Il est donc

proposé de ne retenir une pression d'éclatement égale à la pression de tarage que lorsque les soupapes sont retenues comme une mesure de maîtrise des risques.

	Réservoir muni de soupapes	Réservoir sans soupape
Pression d'éclatement :	<b>Pression de tarage des soupapes</b>	<b>Pression d'épreuve du réservoir</b>

Dans le cas d'un réservoir mobile (sans soupape), la pression d'éclatement peut être considérée comme égale à la pression d'épreuve du réservoir. En effet, on admet généralement qu'un réservoir éclate pneumatiquement à deux fois sa pression d'épreuve, mais par ailleurs, ses caractéristiques mécaniques sont divisées par deux lorsqu'il est chauffé à 500°C. Cette pression d'épreuve est de l'ordre de 25 à 30 bar pour les citernes routières et ferroviaires.

### Formules réglementaires

L'arrêté du 9 novembre 1989 modifié par l'arrêté du 5 juin 2003 fixe des distances d'isolement relatif aux seuils de 600 et 1000  $(kW/m^2)^{4/3}.s$ . Les formules ci-après qui sont une application du modèle TRC avec les hypothèses standard suivantes (arrêté du 5 juin 2003) :

<b>Conditions de stockage</b>	Taux de remplissage	85%
	Pression d'éclatement	Propane : 17 bar abs Butane : 7,5 bar abs
<b>Conditions ambiantes</b>	Température atmosphérique	20°C
	Humidité de l'air	70%

Les pressions de rupture retenues correspondent aux pressions de tarage des soupapes les plus couramment utilisées sur les réservoirs fixes de propane et de butane.

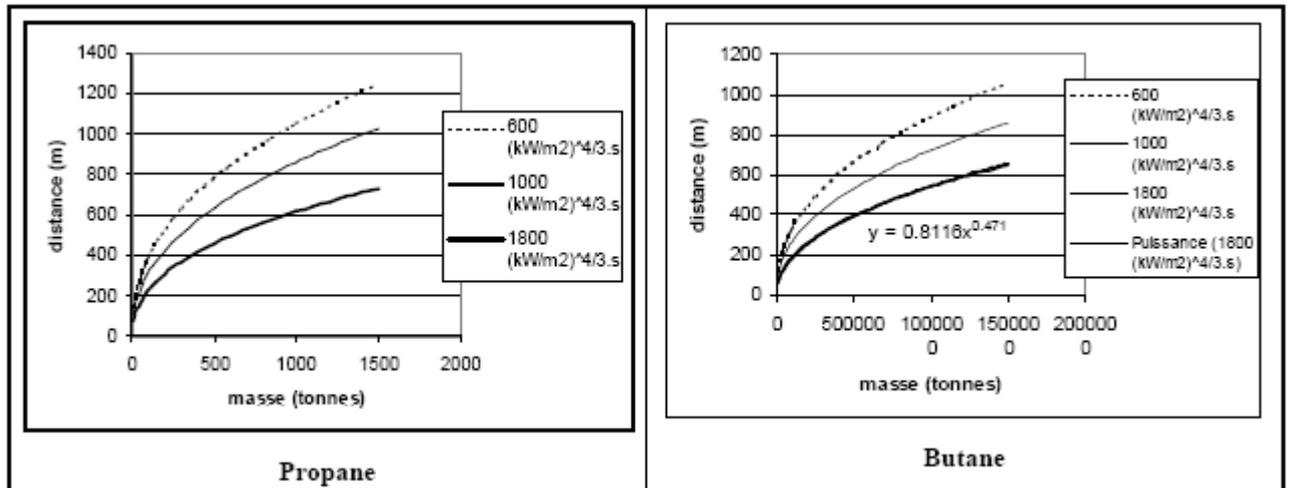
Les distances sont exprimées en mètres, la masse en kilogrammes. La masse correspond à la masse maximale de gaz liquéfié contenu dans le réservoir.

	<b>Butane</b>	<b>Propane</b>
Distance d'isolement relatif au seuil de 1.800 $(kW/m^2)^{4/3}.s$	0,81. M 0.471	1,28 M 0.448
Distance (m) d'isolement relatif au seuil de 1.000 $(kW/m^2)^{4/3}.s$	1,72 M 0,437	1,92 M 0,442
Distance (m) d'isolement relatif au seuil de 600 $(kW/m^2)^{4/3}.s$	2,44 M 0,427	2,97 M 0,425

\* Dans ce tableau, les formules proposées au seuil de 1.800  $(kW/m^2)^{4/3}.s$  ne sont pas réglementaires

**Attention, l'application des formules du 5 juin 2003 aux réservoirs mobiles est erronée et minorante, car la pression d'éclatement des citernes routières et ferroviaires, qui ne sont pas munies de soupape, est plus élevée.**

A titre d'illustration, les distances d'effet sont tracées en fonction de la masse sur la figure suivante.

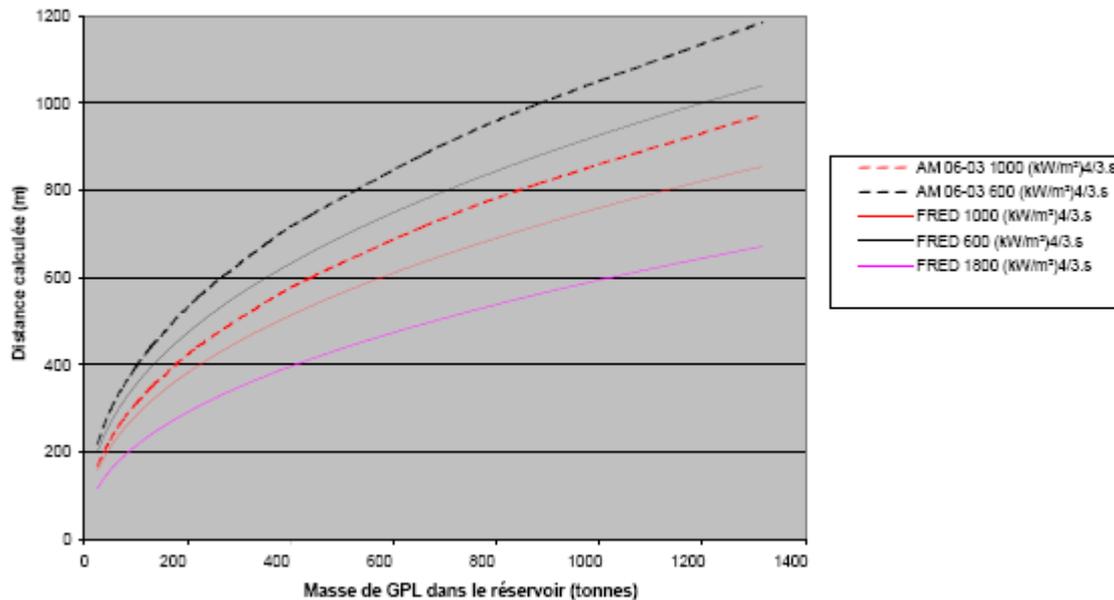


Distances aux seuils des effets thermiques par les formules de l'Arrêté Ministériel du 5 juin 2003 (en l'absence d'une formule réglementaire, les distances à 1800 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s sont calculées directement avec le modèle TRC)

### **Sensibilité du modèle**

Le modèle TRC est sensible à la variation de certains paramètres ou de certaines hypothèses. On note par exemple un écart de l'ordre de 10 % sur les distances calculées avec le logiciel FRED (commercialisé par Shell) et les formules réglementaires, alors que les deux utilisent le modèle TRC. L'écart provient d'une prise en compte différente de l'influence de l'humidité ambiante sur l'absorption du rayonnement thermique, la relation empirique proposée par FRED étant un peu plus complexe, mais aussi plus précise, que la corrélation employée pour l'établissement des formules réglementaires.

### **Comparaison Formules du 5 Juin 2003 et logiciel FRED**



Le modèle est également sensible, dans une certaine mesure, à une incertitude sur les données d'entrée. Par exemple, une augmentation de 10% sur la pression d'éclatement entraîne une augmentation d'environ 2% sur les distances d'effets ; une augmentation de 10% du taux de remplissage entraîne une augmentation de l'ordre de 5% des distances d'effets.

Sans entrer dans une étude systématique de la sensibilité du modèle, on peut retenir que **les formules réglementaires constituent des courbes enveloppe** mais qu'il est possible d'affiner le modèle en améliorant, quand c'est possible, certaines relations empiriques utilisées par le modèle.

En tout état de cause, il est bon de rappeler qu'une variation de l'ordre de 10% sur les distances est certainement inférieure à la précision réelle du modèle.

### Cas des réservoirs mobiles

**L'application des formules du 5 juin 2003 aux réservoirs mobiles est erronée et minorante, car la pression d'éclatement des citernes routières et ferroviaires, qui ne sont pas munies de soupape, est plus élevée.**

Les tableaux suivants présentent les distances d'effets thermiques des BLEVE de citernes mobiles, calculées pour des réservoirs pleins avec le modèle TRC.

<b>PROPANE, réservoir rempli à 85 %</b>				
<b>Réservoirs mobiles</b>	<b>Pression d'éclatement</b>	600 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	1.000 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	1.800 (kW/m <sup>2</sup> )4/3.s
Wagon citerne 119 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>320</b>	<b>255</b>	<b>190</b>
Wagon citerne 90 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>285</b>	<b>225</b>	<b>170</b>
Camion citerne 20 t	25 bar	<b>215</b>	<b>170</b>	<b>125</b>
Camion citerne 9 t	25 bar	<b>155</b>	<b>120</b>	<b>85</b>
Camion citerne 6 t	25 bar	<b>125</b>	<b>100</b>	<b>70</b>

<b>BUTANE, réservoir rempli à 85%</b>				
<b>Réservoirs mobiles</b>	<b>Pression d'éclatement</b>	600 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	1.000 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	1.800 (kW/m <sup>2</sup> )4/3.s
Wagon citerne 119 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>355</b>	<b>285</b>	<b>220</b>
Wagon citerne 90 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>315</b>	<b>255</b>	<b>195</b>
Camion citerne 20 t	25 bar	<b>240</b>	<b>195</b>	<b>145</b>
Camion citerne 9 t	25 bar	<b>170</b>	<b>135</b>	<b>100</b>
Camion citerne 6 t	25 bar	<b>145</b>	<b>115</b>	<b>85</b>

Il est à noter que les distances calculées pour le butane sont légèrement supérieures à celles calculées pour le propane, contrairement à ce que l'on calcule pour les réservoirs munis de soupapes. Cette différence illustre l'influence de la pression d'éclatement sur les distances d'effets. Pour les réservoirs fixes, la pression d'éclatement (égale à la pression de tarage des soupapes) est beaucoup plus basse pour le butane (7 bar) que pour le propane (17 bar), c'est pourquoi les distances liées au propane sont plus grandes que celles liées au butane. Pour les réservoirs mobiles, la pression d'éclatement est équivalente dans les deux cas (27 bar pour les wagons, 25 bar pour les camions), si bien que les distances liées au butane deviennent supérieures à celles liées au propane. Ces valeurs de pression d'éclatement reprises dans les deux tableaux ci-dessus ne sont valables que pour des scénarii où la citerne est soumise à une agression thermique externe. C'est en effet le seul cas où l'on peut considérer que la pression d'éclatement est égale à la pression d'épreuve, l'agression thermique faisant chuter la résistance mécanique de l'enveloppe d'un facteur 2 environ lorsqu'elle est portée à 500°C.

## **5.2. Effets de surpression**

### **Preliminaire**

Les effets de surpression du BLEVE ont été peu étudiés et modélisés en raison de l'impact majorant des effets thermiques. La modélisation de ces effets peut être utile pour :

- le cas où un réservoir est utilisé à moins de 30% de sa capacité nominale (cf graphe effets thermiques –effets de surpression au paragraphe 3.1),
- la détermination des effets dominos par impact sur les structures (seuil de surpression de 200 mbar).
- la détermination des distances d'effets par surpression pour établir les cartes d'aléa pour les PPRT.

La propagation de l'onde de surpression dépend de l'environnement dans lequel elle évolue. En deçà de 50 mbar, l'influence de paramètres extérieurs comme le sens et la vitesse du vent, la topographie, la hauteur et la densité du ciel nuageux, les phénomènes de réflexions à grande échelle sur les basses couches de l'atmosphère etc..., n'est pas prise en compte par les modèles, bien qu'elle ne soit pas toujours négligeable.

Pour assurer la cohérence avec les observations expérimentales décrites au chapitre 3, le modèle retenu doit présenter a minima les caractéristiques suivantes :

- effets de pression maximum lorsque le réservoir est peu rempli,
- effets de pression diminuant lorsque le taux de remplissage augmente,
- calcul et comparaisons des trois pics de pression.

La plupart des modèles disponibles dans la littérature (Prugh 1991, Birk 1996, Planas-Cuchi 2004, ...) sont basés sur un équivalent TNT calculé à partir de l'énergie libérée par la vaporisation. Ils donnent des ordres de grandeur satisfaisants, mais la tendance décrite ci-dessus n'est pas respectée.

Le modèle TRC Shield semble le seul à décrire de manière satisfaisante cette tendance. Il est basé sur un calcul et une comparaison des trois pics successifs observés lors d'un BLEVE :

- pic de détente de la phase gazeuse,
- pic de vaporisation de la phase liquide,
- pic de combustion de la boule de feu.

Toutefois, ce modèle a un domaine de validité restreint à une plage de taux de remplissage compris entre 30% et 85% environ. Si l'on admet

que les effets de surpression sont essentiellement dus à la détente de la phase vapeur, il peut être nécessaire de disposer d'un modèle valide pour des taux de remplissage inférieurs à 30%. Dans ce cas, un modèle d'éclatement pneumatique (basé sur le calcul d'une pression de choc et d'une énergie d'éclatement, l'énergie de Brode par exemple, cf. Heudier 2004) peut être utilisé. A noter qu'un tel modèle peut être employé quel que soit le taux de remplissage, puisqu'il n'est fonction que du volume de la phase gazeuse et de la pression d'éclatement.

Les effets de pression calculés sont toujours inférieurs aux effets thermiques (à seuil d'effet équivalent), sauf pour les faibles taux de remplissage.

Seul le pic de détente de la phase gazeuse est susceptible de produire des niveaux de pression supérieurs à 300 mbar.

Ce seuil n'est atteint que dans le champ proche du réservoir, et donne des distances d'effets inférieures aux effets thermiques à  $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot s$ , excepté si le réservoir est faiblement rempli.

Le cas du seuil réglementaire de 20 mbar est particulier, car il n'a pas d'équivalent en terme d'effet thermique. Les modèles d'éclatement pneumatique donnent des distances à 20 mbar (pour l'éclatement du réservoir vide) du même ordre que le seuil irréversible thermique (pour le BLEVE du réservoir plein). Elle sont tantôt un peu supérieures, tantôt un peu inférieures selon la pression rupture du réservoir. Il n'est toutefois pas nécessaire de modéliser les distances d'effets à 20mbar, l'arrêté du 29 septembre 2005 **relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation** suggère de prendre le double de la distance d'effets à 50mbar.

### **Application aux réservoirs mobiles :**

Les tableaux suivants présentent les distances d'effets de pression associées à l'éclatement de réservoirs ne contenant que du gaz, pour une pression d'éclatement de 27 bar (wagons) ou 25 bar (camions).

La méthode employée est décrite dans le rapport W 15 de l'INERIS, téléchargeable sur le site internet de l'INERIS. Elle consiste à assimiler l'énergie de l'explosion à l'énergie de l'éclatement pneumatique (énergie de Brode), définie par :

$$E = \Delta P.V / (g - 1),$$

où  $\Delta P$  est la surpression dans le réservoir,  $V$  le volume du réservoir et  $g$  le rapport des capacités calorifiques du gaz ( $g = 1,07$  pour le propane ;  $g = 1,1$  pour le butane). La loi de décroissance de la surpression aérienne en champ lointain est donnée par la courbe d'indice 10 de la méthode Multi-Energy (cf. fiche UVCE), avec la distance dimensionnée par l'énergie de Brode.

<b>PROPANE, réservoir vide de liquide</b>						
<b>Réservoirs mobiles</b>	<b>7</b>	300 mbar	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Wagon citerne 119 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>185</b>	<b>370</b>
Wagons citerne 90 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>45</b>	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>170</b>	<b>340</b>
Camion citerne 20 t	25 bar	<b>35</b>	<b>45</b>	<b>65</b>	<b>130</b>	<b>260</b>
Camion citerne 9 t	25 bar	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>45</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Camion citerne 6 t	25 bar	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>90</b>	<b>180</b>

<b>BUTANE, réservoir vide de liquide</b>						
<b>Réservoirs mobiles</b>	<b>Pression d'éclatement</b>	300 mbar	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Wagon citerne 119 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>45</b>	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>160</b>	<b>320</b>
Wagons citerne 90 m <sup>3</sup>	27 bar	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>145</b>	<b>290</b>
Camion citerne 20 t	25 bar	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>115</b>	<b>230</b>
Camion citerne 9 t	25 bar	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>90</b>	<b>180</b>
Camion citerne 6 t	25 bar	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>75</b>	<b>150</b>

### 5.3. Effets missiles

Bien qu'il existe dans la littérature des méthodes pour le calcul de la projection de fragments d'un réservoir qui éclate, aucune ne semble véritablement adaptée à la physique du BLEVE.

L'effet d'un " gros " fragment (plus de 1 kg), peut être mesuré à sa vitesse d'impact au sol. Cette vitesse est égale à sa vitesse de chute libre, et **dans le cas d'un BLEVE, un fragment de ce type est toujours susceptible d'entraîner l'effet létal.**

**La projection de fragment est l'effet qui donne la plus grande distance à la létalité. Néanmoins, cet effet doit être relativisé car il est ponctuel.** Il ne se manifeste qu'au point d'impact du fragment, à la différence des effets de pression et des effets thermiques.

En l'état des connaissances, aucun modèle particulier n'est préconisé.

## 6. Références

HEUDIER L., 2004 : Les éclatements de réservoirs, phénoménologie et modélisation des effets, rapport INERIS W 15, octobre 2004, téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).  
 LEPRETTE E., 2002 : Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques, Rapport INERIS - W 5, téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).  
 SHIELD, S.R., 1993 : A model to predict the radiant heat transfer and blast hazards from LPG BLEVEs. AIChE Symp. Series, vol. 89

### Exemple de calcul des effets d'un BLEVE

A titre d'exemple, les modèles décrits dans cette fiche sont appliqués au BLEVE d'une sphère de propane de 3000 m<sup>3</sup>. Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

Paramètre	Valeur
Nature du produit	Propane
Volume du réservoir	3000 m <sup>3</sup>
Pression d'éclatement	17 bar abs

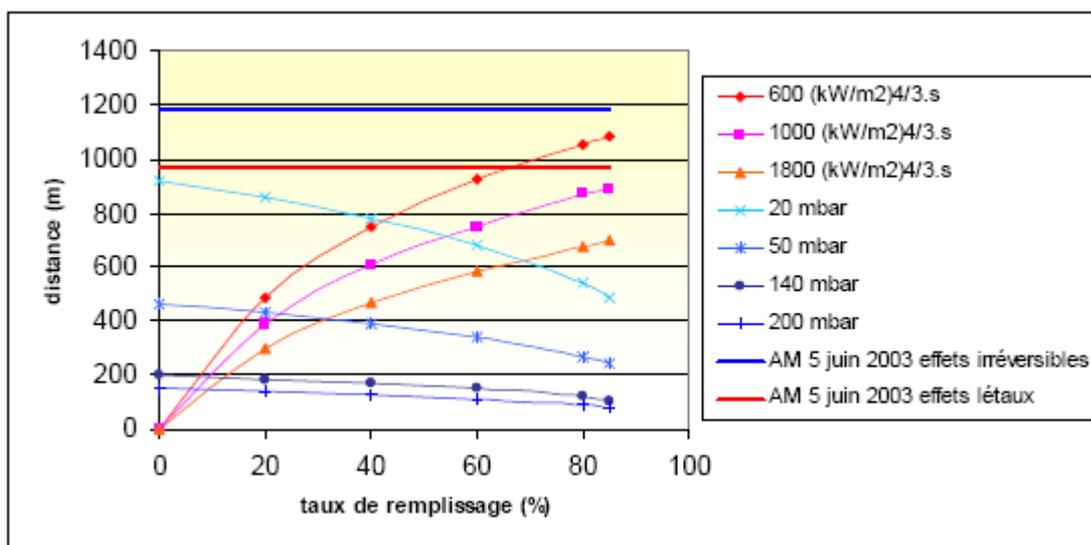
Le taux de remplissage initial du réservoir varie entre 0 et 85%.

Les effets thermiques sont calculés à l'aide du modèle TRC. Les effets de pression sont basés uniquement sur la détente de la phase vapeur, et déterminés à l'aide du modèle d'éclatement PROJEX de l'INERIS (Heudier, 2004).

**Les distances affichées sont valables uniquement pour le jeu d'hypothèses considérées caractérisant un phénomène accidentel. Elles ne sont pas extrapolables à d'autres situations.**

	Seuil	Taux de remplissage (%)				
		0	20	40	60	85
Effets thermiques	600 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	-	490	750	925	1085
	1000 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	-	390	610	750	890
	1800 (kW/m <sup>2</sup> ) 4/3.s	-	300	470	585	700
Effets de pression	20 mbar	920	860	780	680	490
	50 mbar	460	430	390	340	245
	140 mbar	200	180	170	150	105
	200 mbar	150	140	130	110	80
	300 mbar	120	110	100	90	65

Sur la figure ci-dessous apparaissent également les distances d'isolement déterminées par les formules de l'Arrêté Ministériel du 5 juin 2003, qui pour mémoire, sont basées sur les effets thermiques létaux et irréversibles du BLEVE de la sphère remplie à 85%.



## Fiche n° 5 : Phénomènes de dispersion atmosphérique : représentation et cotation en probabilité-gravité

### 1. Généralités

Pour tout phénomène dangereux, notamment les phénomènes de dispersion de gaz, toxique ou inflammable, une cartographie des zones d'effets est nécessaire dans l'étude de dangers, ainsi que la détermination de la gravité et de la probabilité du (ou des) accident(s) correspondants. Ceci servira ensuite de base pour la conduite de la démarche de maîtrise des risques (circulaire du 29 septembre 2005, dite " MMR ") pour les établissements Seveso, ainsi qu'à l'élaboration (par l'inspection des installations classées) des cartographies de l'aléa pour les établissements AS.

La fiche présente donc les hypothèses de représentation des effets pour l'élaboration des cartes d'aléas ainsi que les cas à examiner dans la cadre des études de dangers, avec la détermination des accidents à placer dans la grille de l'annexe V de l'AM du 10 mai 2000 modifié.

Dans la mesure où l'arrêté du 29 septembre 2005 prescrit la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées (" en tenant compte, le cas échéant, des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et de la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident si la cinétique de l'accident le permet "), il convient, quelle que soit la méthodologie retenue, de faire apparaître (éventuellement parmi d'autres) l'accident le plus pénalisant en terme de gravité.

De manière générale, l'objectif de la détermination de la gravité (par la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées) est d'aboutir à une évaluation du niveau de risque présenté par l'installation (ou établissement) et en aucun cas de prévoir " qui " seront les victimes en cas d'accident.

Il n'est question dans cette fiche ni des hypothèses sur la fuite ni du choix du type de modèle à utiliser.

Ce deuxième point fait l'objet d'une autre fiche (n° 2), plus précise pour chaque type de dispersion (toxique, inflammable...). Cette seconde fiche rappelle également l'importance d'une définition précise du terme source de la fuite (pression, température, débit, phase(s) en présence, jet impactant ou non, durée de fuite...) et précise les couples (classes de stabilité-vitesse du vent) à considérer pour les rejets au sol et en hauteur, par exemple à une cheminée. Il existe également une fiche relative au phénomène d'UVCE pour le GPL (fiche n°3, pour les stockages de GPL commerciaux, pas les autres gaz liquéfiés, et pas en unités).

Comme noté ci-dessus, pour les phénomènes de dispersion de gaz, il convient de considérer pour chaque modélisation des couples de stabilité-vitesse de vent. A partir de ces paramètres, associés aux caractéristiques du rejet (taille de la canalisation, taille de brèche, phase(s) en présence, température, pression, débit et durée de fuite...), il est nécessaire de modéliser les effets de la dispersion du nuage, puis de déterminer la gravité correspondante.

Dans la présente fiche, on entend par " fuite " (et donc la probabilité P fuite associée) l'ensemble des caractéristiques du terme source d'une fuite, et notamment la durée du rejet.

NB : La prise en compte des paramètres météorologiques (stabilité, vitesse et direction de vent) n'est possible que pour les sites (installations ou établissement) pour lesquels ces paramètres sont connus précisément, et non à partir des données d'une station météo éloignée, même de quelques kilomètres.

## **2. Représentation des zones d'effets des phénomènes :**

Les zones d'effets des phénomènes sont représentées de la manière suivante : à partir des distances d'effet calculées (pour les différents seuils d'effets), considérer comme limites des zones d'effet les cercles de rayon correspondant. Ce sont ces zones d'effets circulaires (disques/couronnes concentriques) qui doivent apparaître dans l'étude de dangers, et qui serviront pour la cartographie de l'aléa pour les établissements AS.

*Classes de stabilité-vitesse du vent*

**Option 1** : Une première option qui pourra être choisie par l'exploitant est de ne conserver qu'un phénomène dangereux par fuite dont la zone d'effets correspondra au disque de rayon égal à la plus grande des distances d'effets obtenue pour les différents couples (classe de stabilité / vitesse du vent) en ne conservant toutefois que les classes de (stabilité / vitesse) usuellement considérées. La probabilité des phénomènes correspondant aux différentes fuites sera alors égale aux probabilités respectives de ces fuites (caractérisées par leur emplacement et les données du terme source) :

$$P_{ph.d} = P_{fuite}$$

**Option 2** : Une deuxième option est de faire apparaître, pour chaque fuite, plusieurs phénomènes dangereux correspondant à plusieurs choix de couples (stabilité / vitesse du vent). Devront alors a minima apparaître le cas du couple le plus probable (la probabilité du phénomène dangereux sera alors prise égale à la probabilité de la fuite par approximation) et le cas du couple présentant les distances d'effets les plus grandes (la probabilité du phénomène dangereux sera alors prise égale à :

$$P_{ph.d} = P_{fuite} * P_{couple}, \text{ avec } P_{couple} \text{ qui peut être faible).}$$

Dans la suite de cette note, le nombre de phénomènes dangereux par fuite ainsi retenus est appelé N (en pratique, N= 1 dans l'option 1 et N>= 2 dans l'option 2).

#### *Choix des accidents :*

Plusieurs options peuvent être suivies pour la représentation du ou des accident(s) correspondant à chaque phénomène de dispersion à partir d'une fuite (caractérisée par l'ensemble des paramètres de son terme source). Elles sont décrites ci-dessous, en partant de la plus simple mais conservatoire, à la plus fine. Le choix de l'option suivie appartient à l'exploitant. Ceci est applicable pour chaque fuite (en supposant que toutes les hypothèses du terme source sont connues), et chacun des N couples (classe de stabilité/vitesse de vent).

### **3. Options de représentation et de détermination de la gravité des accidents correspondants :**

Différentes options, de niveau de finesse croissant, sont possibles (au choix de l'exploitant).

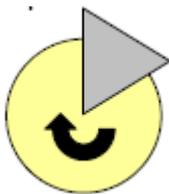
Dans les différentes options, il est proposé de prendre un secteur angulaire de 60°. L'exploitant peut démontrer que l'angle est plus petit, mais l'attention est appelée sur le fait que, pour une fuite de produit toxique, la durée de fuite, la durée de persistance du nuage peuvent être

importantes et que le nuage peut être soumis à des variations angulaires du vent pendant la dispersion du nuage.

**Option A** : simple et conservatoire, un seul accident correspondant à chaque phénomène de dispersion, par couple (classes de stabilité/vitesse du vent) retenu : conservatoire en probabilité et en gravité

Pour la détermination de la gravité de l'accident correspondant à ce phénomène de dispersion, prendre le secteur angulaire choisi (usuellement 60°) correspondant à la zone la plus densément peuplée (en faisant tourner ce secteur sur l'ensemble des directions). Compter alors le nombre de personnes exposées pour chacun des niveaux d'intensité, pour en déduire la gravité (cf fiche n° 1 " éléments pour la détermination de la gravité "). Sur le schéma, cela correspond aux personnes présentes dans l'intersection du disque des effets et du secteur angulaire représenté par le triangle.

® Dans cette option, la probabilité de l'accident est celle du phénomène dangereux, et la gravité est celle correspondant à la position du secteur la plus pénalisante.



**Option B** : un peu plus fine : plusieurs accidents correspondant à chaque phénomène de dispersion : le plus probable **et** le plus grave doivent apparaître, tenant compte de la rose des vents.

a. Le plus probable : dans le cas où la rose des vents indique qu'une direction est majoritaire (secteur de 60° dans lequel les vents s'ont observés au moins 30% du temps) considérer les personnes " sous le vent " pour ce secteur angulaire de 60° .

® La probabilité de l'accident est alors  $P_{acc} = P_{ph d} * P_{direction vent}$ , avec  $P_{direction vent}$  importante (prise égale à 1), donc  $P_{acc}$  assimilée à  $P_{ph d}$ , mais la gravité n'est pas majorée.

**ET**

b. Le plus grave : quelles que soient les directions de vent les plus observées, prendre pour la gravité le secteur angulaire de 60° tel que le nombre de personnes exposées

soit le plus grand.

® On a également  $P_{acc} = P_{ph d} * P_{direction vent}$ , mais avec  $P_{direction vent}$  qui peut être faible, et donc  $P_{acc}$  peut être d'une classe de probabilité plus faible que  $P_{ph d}$ . La gravité est en revanche conservatoire.

NB : Prendre un angle de 60° ne signifie pas découper la rose des vents en 6 secteurs, mais bien faire tourner ce secteur sur l'ensemble de la rose des vents. Dans le cas de l'option B, les deux secteurs déterminés peuvent se superposer en partie.

### **Conclusion :**

Pour une même fuite, selon les N couples (conditions de stabilité/vitesse de vent) retenus en vertu de la partie 2 de cette note, on a au moins N phénomènes et :

- selon l'option A, N accidents de gravité et de probabilité conservatoires,
- selon l'option B, 2N (ou plus) accidents, mais moins conservatoires

### **4. Conclusion générale**

Dans le cas où l'exploitant dispose des données météorologiques propres à son site (ou à sa proximité immédiate), il peut ainsi déterminer les accidents représentatifs pouvant survenir par une série de triplets stabilité / vitesse / direction du vent, en conservant, selon ses choix plus ou moins conservatoires :

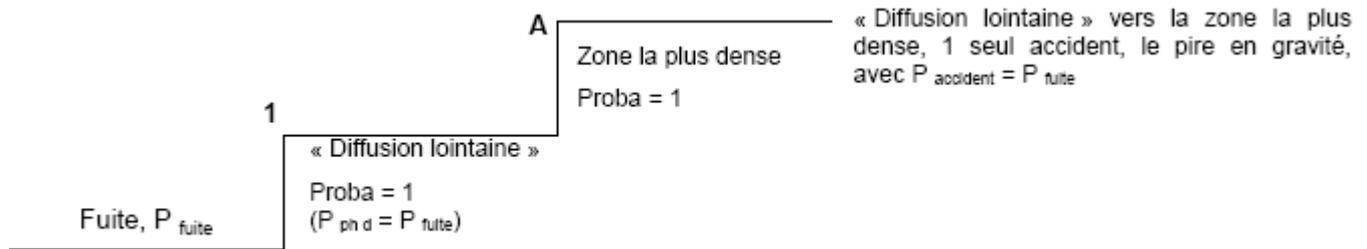
- le seul triplet présentant la gravité la plus importante et la probabilité prise égale à celle de la fuite, (cf. exemple a) ci-dessous)
- plusieurs accidents se différenciant par des classes de stabilité / vitesse et/ou direction de vent multiples, en effectuant alors le produit de la probabilité de la fuite par la probabilité d'occurrence des conditions de vent choisies.

#### Exemples :

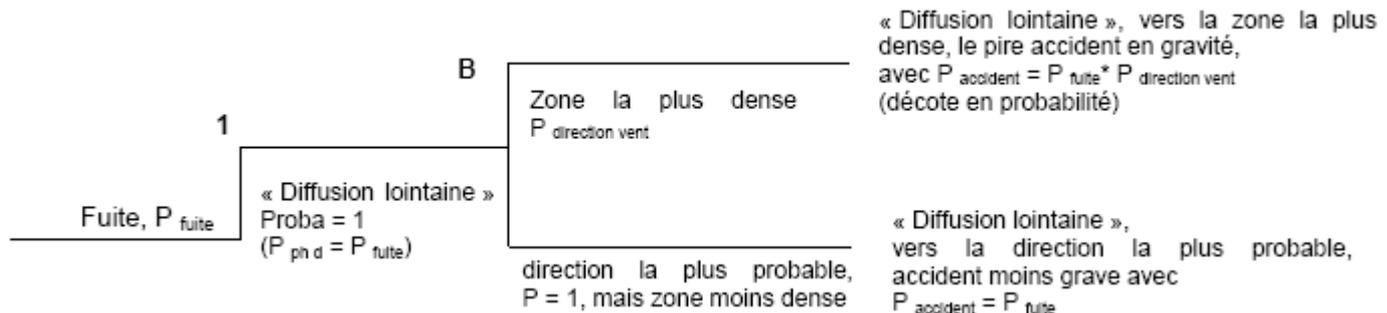
Dans chaque exemple ci-dessous, la probabilité notée à chaque étape du raisonnement est la probabilité conditionnelle sachant que l'étape située à sa gauche est réalisée.

Dans cet exemple, on appellera " diffusion lointaine " la diffusion faite selon le couple (stabilité/vitesse de vent) tel que la distance d'effets soit la plus importante.

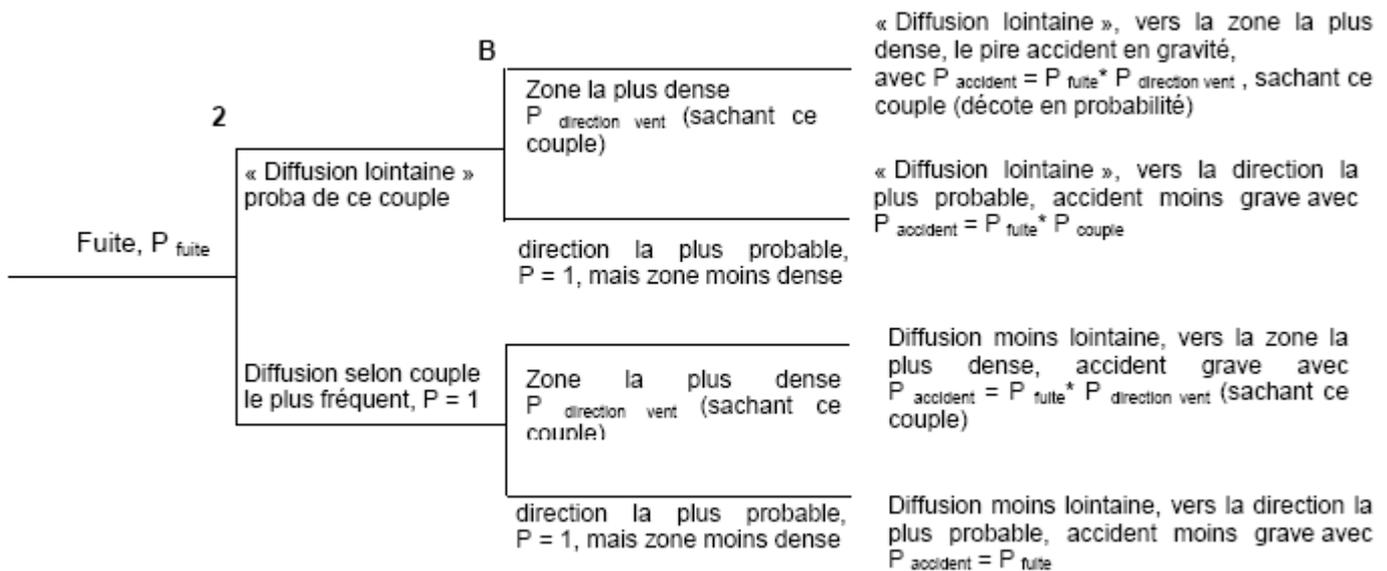
a) avec l'option **1** puis l'option **A** :



b) avec l'option 1 puis l'option B :



c) avec l'option 2 puis l'option B :



Attention comme indiqué en tête de l'exemple, les directions de vent ne sont a priori pas indépendantes des couples (stabilité/vitesse de vent). Dans l'option **B**, c'est donc la probabilité de la direction de vent, sachant quel est le couple (stabilité/vitesse) considéré en suivant l'option **2**, qui est à prendre en compte, et non la simple statistique météorologique d'occurrence de ce vent dans l'année.

## 5. cas particulier de l'UVCE

Les UVCE constituent un cas particulier de dispersion atmosphérique, l'ensemble des indications précédentes est donc valable (chapitres 1 à 4), avec le cas particulier de la prise en compte des deux types d'effets qui ne sont pas forcément " initiés " au même endroit. Il convient de faire apparaître la gravité maximale associée à l'ensemble des effets, thermiques et de surpression.

Rappel : une fois les effets représentés, il convient de différencier la cotation en gravité, avec sa probabilité associée, de la définition de l'aléa.

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre qui produit :

- des effets de pression,
- des effets thermiques.

*Nota : Dans le cas des GPL (butane et propane) le présent chapitre doit être lu en parallèle de la fiche UVCE (fiche n°3) rédigée par le groupe de travail national "GPL" (axé sur les stockages, pas sur les unités industrielles de fabrication et d'utilisation de ce type de produits). Pour d'autres gaz (plus réactifs ex : H<sub>2</sub>...), ces propositions devront éventuellement être adaptées.*

### 5.1. UVCE en champ libre

#### 5.1.1. Représentation des zones d'effets :

Concernant les effets de pression :

Il existe plusieurs méthodes de calcul des effets de pression d'un UVCE, toutefois celles basées sur l'équivalent TNT sont inadaptées et pas nécessairement majorantes.

En champ libre, après détermination des dimensions maximales du nuage inflammable comme indiqué au chapitre 2 de la présente fiche, les effets de surpression sont à étudier à partir du point d'inflammation potentiel, c'est-à-dire un (ou des) point(s) chaud(s) judicieusement démontré(s). Les zones d'effets sont alors un (ou des) ensemble(s) de disques/couronnes concentriques (correspondant aux seuils d'effets) centré(s) sur ce(s) points d'inflammation, tenant compte de la réactivité du gaz inflammable.

Concernant les effets thermiques :

Dans le cas de l'explosion d'un nuage de gaz au repos en espace libre ou "**flash fire**" la cartographie des zones d'effets thermiques, qui serviront notamment pour définir la carte d'aléa, est constituée de

- disques/couronnes centrés sur le point de fuite et de rayon égal à :
- La distance à la LII pour les effets létaux significatifs et les premiers effets létaux ;
  - 1,1 fois la distance à la LII pour les effets irréversibles.

### 5.1.2. Evaluation de la gravité

Les options définies au chapitre 3 s'appliquent, la mesure de l'angle de référence pourra également être prise égale à 60°. Quelle que soit la position du secteur angulaire, la gravité de l'accident liée aux effets thermiques du phénomène sera déterminée par la portion du disque correspondante (comme pour les effets toxiques). La gravité liée aux effets de surpression est déterminée par le nombre de personnes exposées dans les disques correspondant aux effets de surpression, sans compter deux fois les personnes exposées aux deux types d'effets.

### 5.1.3. Récapitulatif UVCE champ libre :

	Représentation cartographique des zones d'effets dans l'EDD	Cotation P-G (personnes exposées)	Aléa
Effets thermiques (champ libre)	disques centrés sur le point de fuite	Nombre de personnes exposées dans le secteur de 60°  ® point 3 de la présente fiche (option A ou B)	disques centrés sur le point de fuite
Effets de surpression (champ libre)	un ou des ensemble(s) de disques centrés sur le(s) point(s) d'inflammation potentiel(s) (cf. fiche UVCE)	Nombre de personnes exposées dans les zones de surpression représentées par un ou des cercle(s) centré(s) sur le(s) point(s) d'inflammation, dans le secteur angulaire étudié	un ou des ensemble(s) de disques concentriques centré(s) sur le(s) point(s) d'inflammation

## 5.2. UVCE en champ encombré

### 5.2.1. Représentation des zones d'effets :

Concernant les effets de pression :

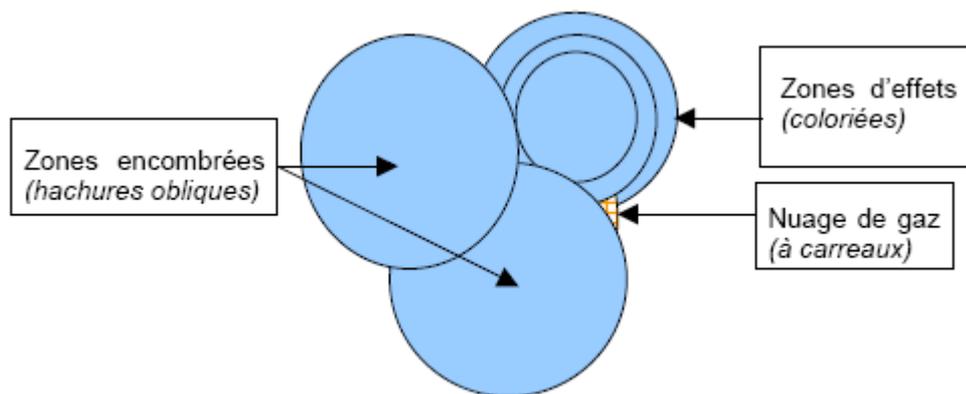
Il conviendra, pour une situation réelle où la dimension maximum du nuage explosif (cercle enveloppe des nuages de gaz possibles selon les stabilités et vitesses de vent, à fuite donnée, comme dans l'option 1 ci-dessus) a été préalablement estimée, de repérer les endroits où la densité d'obstacles ou le degré de turbulence du nuage sont susceptibles d'être importants et modéliser l'explosion globale.

La réactivité propre du gaz inflammable doit également être prise en considération.

Les distances d'effets calculées ne sont pas liées directement à la quantité de produit rejeté, ni au volume des nuages inflammables formés, mais bien au volume des zones d'encombrement et de confinement rempli par le mélange inflammable (et au niveau de confinement).

® La cartographie des zones d'effets de surpression, qui serviront notamment pour définir la carte d'aléa dans le cas des établissements AS, est constituée de l'union des disques centrés sur ces zones encombrées, de rayons déterminés par la modélisation.

NB : sur le schéma ci-dessous n'apparaissent pas les zones d'effets correspondant au seuil de 20mbar, pour faciliter la lecture.



Dans le cas où des nuages de gaz peuvent provenir de nombreuses sources, et dériver vers différentes zones encombrées (exemple des unités dans les raffineries de pétrole), on pourra prendre les disques autour de chaque zone encombrée et cumuler les probabilités des différentes fuites menant à un nuage de gaz emplissant cette zone.

Concernant les effets thermiques :

En champ encombré, les effets thermiques sont à étudier comme dans le cas du champ libre, cf 5.1.1 (disques centrés sur le point de fuite, de rayon égal à la distance à la LII pour les effets létaux significatifs et les premiers effets létaux ; et 1,1 fois la distance à la LII pour les effets irréversibles).

### **5.2.2. Evaluation de la gravité**

Les mêmes principes qu'en champ libre s'appliquent.

De plus, si le secteur angulaire dans la position étudiée contient tout ou partie d'une zone encombrée, il faut ajouter à la gravité due aux effets thermiques (ci-dessus) la gravité due à l'intégralité de la zone d'effets de

surpression induite par la zone encombrée. Attention toutefois à ne pas compter deux fois les mêmes personnes.

### 5.2.3. Récapitulatif pour le champ encombré

Dans le cas où des nuages de gaz peuvent provenir de nombreuses sources, et dériver vers différentes zones encombrées (exemple des unités dans les raffineries de pétrole), on pourra prendre les disques autour de chaque zone encombrée et cumuler les probabilités des différentes fuites menant à un nuage de gaz emplissant cette zone.

Concernant les effets thermiques :

En champ encombré, les effets thermiques sont à étudier comme dans le cas du champ libre, cf 5.1.1 (disques centrés sur le point de fuite, de rayon égal à la distance à la LII pour les effets létaux significatifs et les premiers effets létaux ; et 1,1 fois la distance à la LII pour les effets irréversibles).

### 5.2.2. Evaluation de la gravité

Les mêmes principes qu'en champ libre s'appliquent.

De plus, si le secteur angulaire dans la position étudiée contient tout ou partie d'une zone encombrée, il faut ajouter à la gravité due aux effets thermiques (ci-dessus) la gravité due à l'intégralité de la zone d'effets de surpression induite par la zone encombrée. Attention toutefois à ne pas compter deux fois les mêmes personnes.

### 5.2.3. Récapitulatif pour le champ encombré

	Représentation cartographique des zones d'effets dans l'EDD	Cotation gravité (personnes exposées)	Aléa
Effets thermiques (champ encombré)	disques centrés sur le point de fuite	Nombre de personnes exposées dans le secteur de 60°  → point 3 de la présente fiche (option A ou B)	disques (correspondant aux différents seuils d'effets) centrés sur le point de fuite
Effets de surpression (champ encombré)	un ou des ensemble(s) de disques centrés sur les zones encombrées (quelle que soit la position du point d'inflammation)	Nombre de personnes exposées dans les zones de surpression représentées par un ou des cercle(s) centré(s) sur le(s) zone(s) encombrées se trouvant dans le secteur angulaire étudié	un ou des ensemble(s) de disques concentriques (correspondant aux seuils d'effets) centré(s) sur la(les) zone(s) encombrée(s)

## 6. Exemples

### 6.1. Toxiques :

On considère une fuite de probabilité de classe D dans un site dont la rose des vents du site est la suivante :

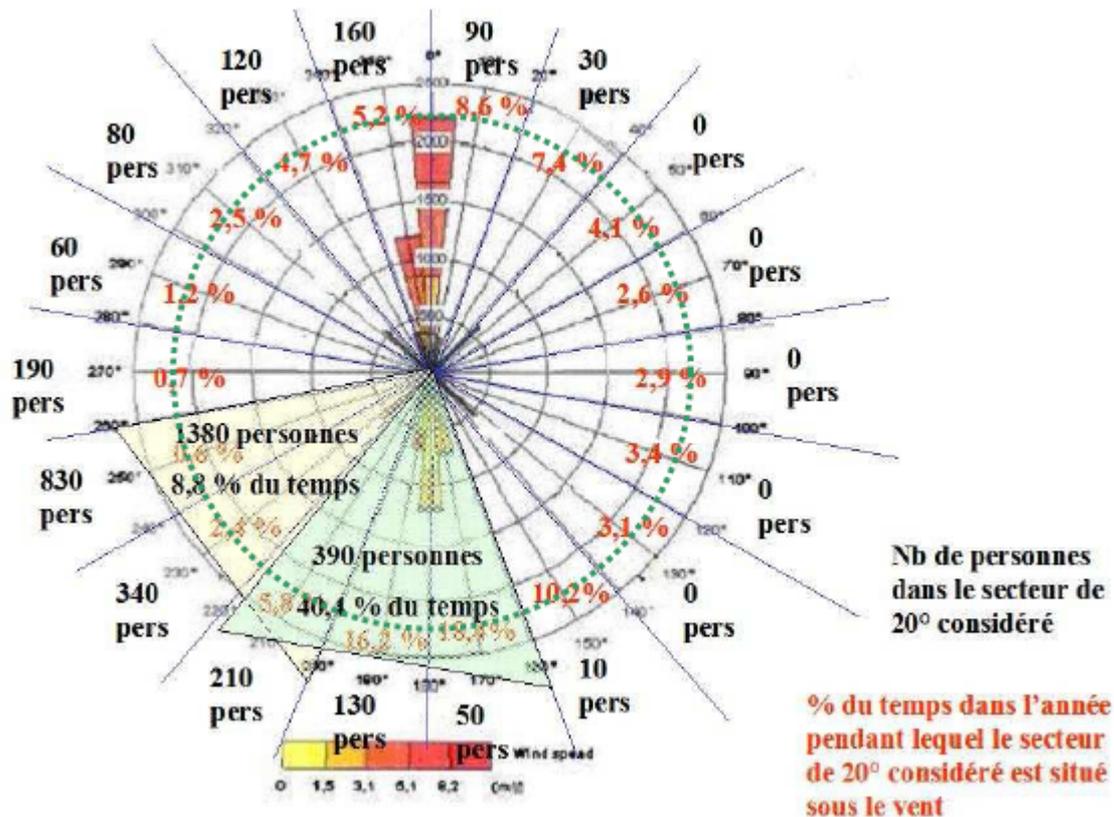


Illustration des différentes options sur cet exemple :

**Option 1** : cercle de rayon 2200m (tel qu'apparaît en pointillés sur le schéma ; vers le nord dans la rose des vents, correspondant au panache de dispersion le plus long).

**Option 2** : n'apparaît pas sur cet exemple, il faudrait connaître les couples stabilité/vitesse de vent pour ce lieu, ce qui n'est pas le cas.

**Options A et B pour la détermination de la gravité :**

considérons pour simplifier l'exemple, que le nombre de personnes indiqué correspond au nombre de personnes présentes dans les zones des effets irréversibles (et non létaux), ce qui permet de déterminer plus simplement la gravité correspondante.

Selon l'option A, on regarde le nombre de personnes maximales impactées en même temps (dans un angle de 60°), quelle que soit la probabilité que le vent souffle dans cette direction. L'accident correspondant est représenté ici par le secteur jaune. Il impacte potentiellement 1380 personnes exposées à des effets irréversibles, la gravité associée correspond donc au niveau " **désastreux** " de l'échelle, avec une probabilité égale à la probabilité de la fuite, soit **D**.

Selon l'option B, on regarde :

a) d'une part, l'accident le plus probable : vers le sud dans ce cas (secteur vert). On a alors un accident impactant 390 personnes, soit une gravité " **catastrophique** ", avec une probabilité égale à la probabilité de la fuite, soit **D**.

b) d'autre part, l'accident le plus grave : vers l'est ici (secteur jaune). On a alors un accident impactant 1380 personnes, soit une gravité correspondant au niveau " **désastreux** ", avec une probabilité décotée du fait de la faible probabilité que le vent souffle dans cette direction, donc probabilité de classe **E**.

Conclusion :

option A → 1 accident, D-désastreux, donc classé NON

option B → 2 accidents :

a) D-catastrophique → MMR rang 2

**et**

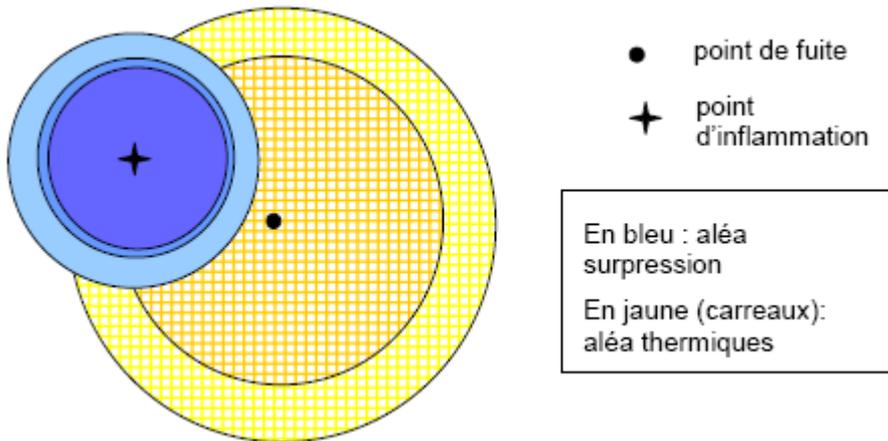
b) E-désastreux → MMR rang 2 (établissement existant),

soit 2 accidents MMR rang 2 " au lieu " d'un seul accident classé NON.

## **6.2. UVCE :**

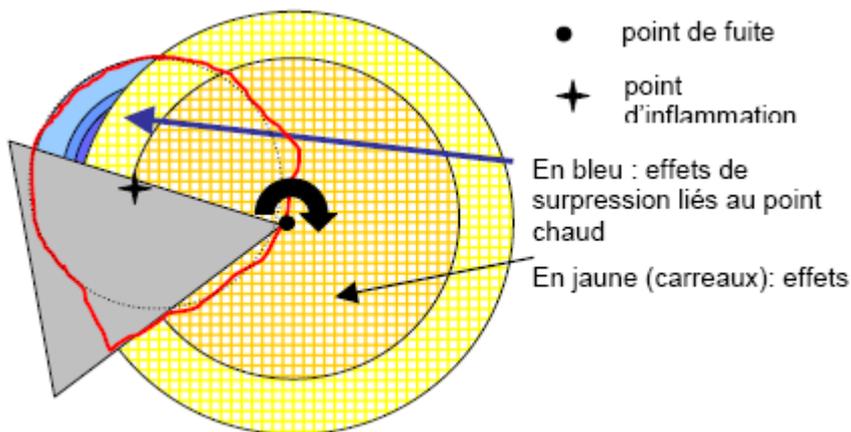
### **6.2.1. UVCE en champ libre**

**Détermination de l'aléa :**



### Détermination de la gravité en champ libre :

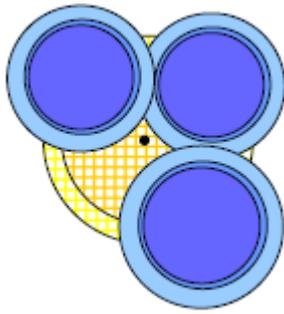
Compter dans ce cas, pour déterminer la gravité, toutes les personnes présentes dans l'union du secteur gris de 60° avec les disques jaunes (carreaux), plus toutes les personnes situées dans les disques bleus, sans compter les personnes deux fois bien sûr (toutes les zones entourées de rouge), en faisant tourner le secteur angulaire de manière à déterminer le nombre maximum de personnes exposées.



### 6.2.1. UVCE en champ encombré :

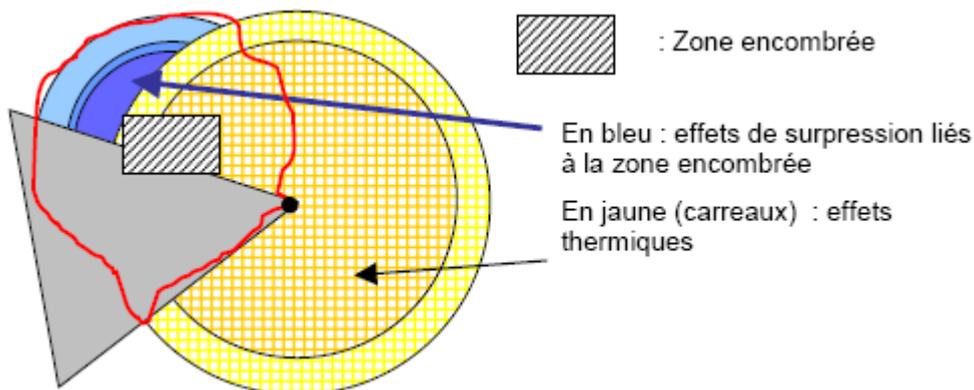
#### Détermination de l'aléa

La détermination de l'aléa de surpression devra tenir compte des différentes contributions liées à toutes les zones encombrées, trois sur l'exemple représenté ci-dessous.



Détermination de la gravité dans le cas où le secteur angulaire atteint une (ou plusieurs) zone(s) encombrée(s) :

Compter dans ce cas pour déterminer la gravité toutes les personnes présentes dans l'intersection du secteur gris avec les disques jaunes (carreaux) , plus toutes les personnes situées dans les disques bleus, sans compter les personnes deux fois bien sûr (toutes les zones entourées de rouge).



## Fiche 6 : Fuites de tuyauteries : représentation et cotation

L'objet de la présente fiche est de formuler des propositions de modélisation des phénomènes dangereux susceptibles de se produire sur des tuyauteries, en mettant en œuvre des hypothèses raisonnablement majorantes. Il n'est pas ici question à proprement parler du niveau de sécurité présenté par les tuyauteries en fonction de leur mode de conception, construction, exploitation, maintenance...

Il convient de signaler qu'au-delà des tuyauteries (par essence linéaires), les ensembles de tuyauteries sont associés à des brides, clapets, régulateurs de pression, etc. (points discrets) qui ne devront pas être omis par ailleurs dans les études de dangers. Ces points singuliers constitués par les équipements " connexes " aux tuyauteries ne sont pas traités dans la présente fiche. On entend ici par " tuyauterie " les tuyaux permettant la circulation des fluides à l'intérieur d'une installation classée ou d'un établissement, y compris celles relevant de la réglementation

canalisations de transport à l'intérieur des installations classées. L'objet de la présente fiche est de traiter le cas des tuyauteries aériennes. Pour les tuyauteries enterrées, la représentation sera adaptée aux caractéristiques des événements susceptibles de se produire (remontée de gaz le long de la tuyauterie, libération de gaz par certains conduits menant à l'air libre...).

Elle propose une méthodologie facultative pour permettre d'une part de simplifier les cas où plusieurs tuyauteries suivent le même parcours, et d'autre part pour en extraire quelques accidents représentatifs alors que :

- des fuites d'une infinité de diamètres (de 0 à 100%, voire plus) peuvent se produire,
- les fuites peuvent se produire en tout lieu de la tuyauterie.

Elle est à lire et utiliser en lien avec les autres fiches relatives respectivement à la dispersion atmosphérique (fiche 2), aux UVCE (fiche 3) et à la représentation et cotation en probabilité et gravité des phénomènes de dispersion atmosphérique (fiche 5), ainsi que la fiche présentant des éléments pour la détermination de la gravité (fiche 1).

## **1. Modélisation des tuyauteries et choix du nombre de phénomènes représentatifs**

### **1.1. Notion de tuyauteries équivalentes**

On pourra considérer dans les études de dangers que toutes les tuyauteries peuvent être rapportées à " quelques " tuyauteries équivalentes (qu'on pourrait appeler aussi " tuyauteries enveloppes ") qui peuvent être :

- Dans le cas d'une tuyauterie réelle, la tuyauterie elle-même,
- Dans le cas d'un rack de tuyauteries (ou tuyauteries de parcours proche) sans possibilité d'effets domino en cas de fuite sur l'une d'elles (c'est-à-dire le plus souvent ne contenant pas de fluide inflammable, ou bien pas de fluide corrosif susceptible, en cas de fuite, d'endommager la/les tuyauteries voisines de métallurgie moins résistante), la tuyauterie équivalente est alors :
  - une tuyauterie suivant le même parcours,
  - dont les distances d'effets toxiques pour chaque seuil d'effets sont celles engendrées par la tuyauterie du rack engendrant les plus grandes distances d'effet toxique (sans oublier les synergies entre substances toxiques),
  - dont les autres types d'effets éventuels suivent le même principe,
  - pour laquelle la probabilité du phénomène de fuite équivaut à la somme des probabilités de cette fuite sur chacune des tuyauteries composant le rack (pour tenir compte d'une contribution linéique plus importante sur des tuyauteries " indépendantes ").

Note : En toute rigueur, dans ce dernier cas, la somme des probabilités est légèrement majorante. Un calcul plus rigoureux pourra être mené, au besoin.

NB : Dans le cas particulier des fuites suite à choc sur un rack, il convient de déterminer les effets par cumul des termes sources.

Dans le cas d'un rack de tuyauteries (ou tuyauteries proches) présentant la possibilité d'effets dominos en cas de fuite sur au moins l'une d'elles, on pourra alors avoir recours à deux tuyauteries équivalentes selon le phénomène étudié :

- celle décrite juste au-dessus pour les phénomènes ne mettant pas en œuvre d'effet domino,
- et pour les phénomènes pouvant entraîner des effets dominos : tuyauterie de même parcours, présentant des distances d'effets résultantes des différentes contributions en cas d'effet domino. La probabilité du phénomène est prise égale à la somme des probabilités des initiateurs menant à un effet domino.

## 1.2. Choix des phénomènes représentatifs

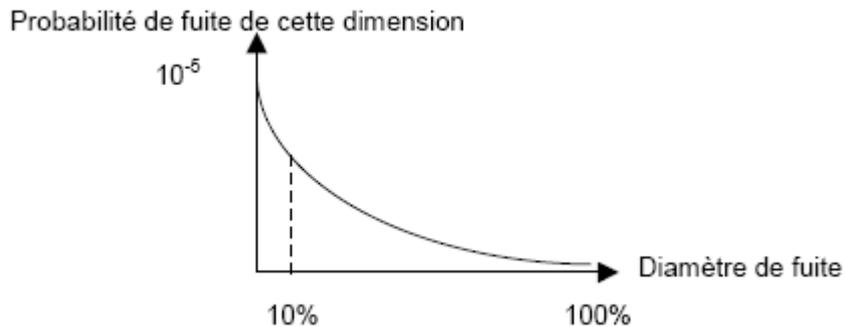
Pour les tuyauteries, le lieu de fuite ainsi que le type de fuite (taille de brèche, élément déterminant du terme source) sont multiples, et il convient de réduire ce nombre infini à un nombre plus facile à manipuler, représentatif de ce qui peut se produire dans l'installation. L'exploitant a le choix du nombre de phénomènes représentatifs qu'il fait apparaître dans l'étude de dangers.

Pour chaque tuyauterie, ou tuyauterie équivalente, **doit** toutefois apparaître au moins la configuration la plus pénalisante (généralement la rupture 100%). L'exploitant peut cependant faire apparaître en outre les phénomènes (et accidents correspondants) liés à des fuites de taille inférieure, par exemple 50% du diamètre de la tuyauterie et 15 mm.

NB : pour les cas de fuites longues alimentées produisant des distances d'effets supérieures au cas de la rupture guillotine, c'est ce cas et non la rupture 100% qui doit être étudié.

Règle : Pour chaque diamètre de fuite ainsi retenu, la probabilité à associer aux phénomènes (et accidents correspondants) est le cumul des probabilités depuis le diamètre immédiatement inférieur retenu.

*Exemple* : dans le cas d'une tuyauterie de diamètre 100mm



si l'exploitant retient la seule fuite de diamètre 100 mm, on aura un phénomène dangereux auquel sera associée la probabilité  $P =$  intégrale de  $d=0$  à  $d=100\text{mm}$  de  $dP(d)$  (l'ensemble de l'aire sous la courbe ci-dessus).

si l'exploitant retient les fuites de diamètre 15, 50 et 100mm, on aura trois phénomènes dangereux auxquels seront associées les probabilités suivantes :

- fuite 15mm :  $P =$  intégrale de  $d= 0$  à  $d =15\text{mm}$  de  $dP(d)$
- fuite 50mm :  $P =$  intégrale de  $d= 15$  à  $d =50$  mm de  $dP(d)$
- fuite 100mm :  $P =$  intégrale de  $d= 50$  à  $d =100\text{mm}$  de  $dP(d)$

Par ailleurs, s'il apparaît, après justification, que des les phénomènes liés à des fuites de diamètre inférieur au plus petit étudié (ici, 15mm) ne produisent pas d'effets à l'extérieur, ni de manière directe, ni par effet dominos, alors seuls les phénomènes correspondant aux types de fuites de diamètre supérieur (ici, 50 et 100 mm) sont utilisés dans la suite de l'EDD.

Pour ce qui est des lieux de fuite possibles, l'approche est détaillée dans les paragraphes 3 (pour la cotation en probabilité et gravité des accidents) et 4 (pour la détermination de l'aléa) de la présente fiche.

## **2. Remarques générales sur les tuyauteries, la grille de l'annexe V de l'AM du 10 mai 2000 et les PPRT**

Il convient de bien se rappeler que les deux préoccupations partent de logiques différentes :

- la grille de l'annexe V de l'AM du 10 mai 2000 (reprise dans la circulaire " MMR " du 29 septembre 2005) se préoccupe des accidents pouvant se produire à installation donnée
- les PPRT partent des aléas auxquels chaque point de l'espace est soumis.

Les probabilités pour les phénomènes dangereux et accidents pouvant se produire sur les tuyauteries s'expriment généralement en probabilité linéique  $P_l$ . Dans un certain nombre de cas (tuyauterie longue, cf. paragraphe suivant), la probabilité que l'installation soit à l'origine d'un phénomène dangereux ( $P_l \times$  longueur de la tuyauterie) est donc très grande par rapport à la probabilité qu'un point de l'espace soit touché par les effets d'un phénomène dangereux.

Cette propriété obligera à recourir à une modélisation beaucoup plus approfondie des accidents à placer dans la matrice MMR par rapport à celle mise en œuvre pour la démarche PPRT.

### 3. Choix des accidents positionnés dans la grille de l'annexe V de l'AM du 10 mai 2000 modifié – considérations sur la gravité.

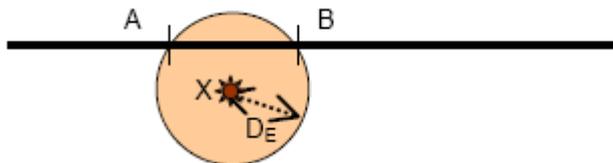
#### 3.1. Cas d'une tuyauterie longue.

# Une tuyauterie est considérée comme longue dans la présente fiche si sa longueur, sur un tronçon homogène, est d'une longueur supérieure au double des distances d'effets qu'une fuite sur cette tuyauterie peut engendrer. En pratique, ce type de configuration n'est pas très courant dans les installations classées (la présente fiche ne vise pas les canalisations de transport hors des établissements).

#### # Probabilité :

Un point X de l'espace autour d'une tuyauterie longue ne peut être affecté par les effets d'un événement dangereux survenu sur cette tuyauterie que si cet événement se produit sur le tronçon [AB] de la tuyauterie situé à une distance du point X inférieure à la distance maximale d'effet (au sens des distances d'effets irréversibles  $D_{EI}$ , " premiers " effets létaux  $D_{EL}$ , effets létaux significatifs  $D_{ELS}$ ).

On considère que les zones d'effets sont centrées sur la tuyauterie. [NB : pour les effets de surpression de l'UVCE, ce n'est généralement pas le cas.]



Ce tronçon [AB] de tuyauterie est donc délimité par l'intersection de la sphère centrée au point X considéré et de rayon  $D_E =$  distance d'effet pour l'intensité de l'effet pris en compte ( $D_{EI}$ ,  $D_{EL}$ ,  $D_{ELS}$ ). Ce tronçon [AB] de tuyauterie mesure donc au maximum  $2D_E$  (soit  $D_E$  de part et d'autre du point s'il est situé sur la tuyauterie).

NB : ce cercle ne représente pas la zone d'effets d'un événement se produisant sur le tronçon AB !

Conclusion : on peut ainsi entourer la tuyauterie d'une zone d'effets correspondant à un ensemble de sphères de rayon  $D_E$  glissant tout le long de la tuyauterie. Pour cette zone d'effets, la probabilité de survenance en un de ses points de l'effet considéré (donc du phénomène dangereux) peut être raisonnablement majorée par :

$$P = P_l \times 2 \times D_E$$

-  $P_l$  étant la probabilité linéique pour la plage de tailles de brèche correspondant au type de fuite étudié (par exemple : de 0 à 15 mm, ou de 15 mm à la rupture), et pour le type de tuyauterie concerné (fonction du diamètre, et le cas échéant d'autres paramètres tels que le fluide véhiculé, l'âge, le niveau de sensibilité,...)

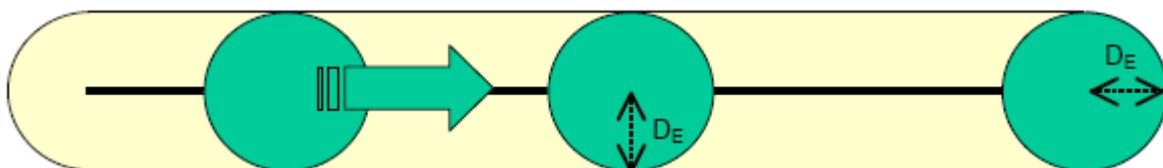
-  $D_E$  étant la distance d'effets correspondant aux effets " E " ( $D_{EI}$ ,  $D_{EL}$ ,  $D_{ELS}$ )

→ il convient donc de prendre, comme probabilité des phénomènes de fuite, sur une tuyauterie " longue ",  **$P = P_l \times 2 \times D_E$**

De plus, pour simplifier les choses et éviter d'avoir des probabilités différentes en fonction du seuil d'effets considéré, la probabilité pourra être calculée sur la base de la distance des effets irréversibles ( $D_{EI}$ ) pour les différents seuils d'effets, en gardant bien les différentes distances d'effets pour la représentation (cartographique) de ces effets.

### # Représentation des effets :

Si un phénomène dangereux se produit en un point de la tuyauterie, les effets du phénomène seront sensibles sur une sphère de rayon  $D_E$  (pour chaque seuil d'effet). Les zones d'effets de l'ensemble des phénomènes possibles seront donc représentées par superposition des sphères (centrées tout le long de la tuyauterie), donc à une forme allongée, distante de  $D_E$  autour de la tuyauterie.



NB : ce schéma illustre les zones d'effets pour un seuil d'effets. En pratique, il convient de représenter les différentes formes allongées correspondant aux différents seuils d'effets mentionnés à l'article 9 de l'arrêté du 29 septembre 2005 (dit arrêté PCIG).

# **Détermination de la gravité de l'accident** : la gravité de l'accident associé à ces phénomènes est déterminée par le nombre de personnes exposées aux effets dans les différentes sphères.

Une première possibilité, simple mais très conservatrice, est de déterminer la position de la sphère menant au plus grand nombre de personnes exposées et d'attribuer à un seul accident représentatif cette gravité et une probabilité égale à  $P_1 \times$  longueur de la tuyauterie.

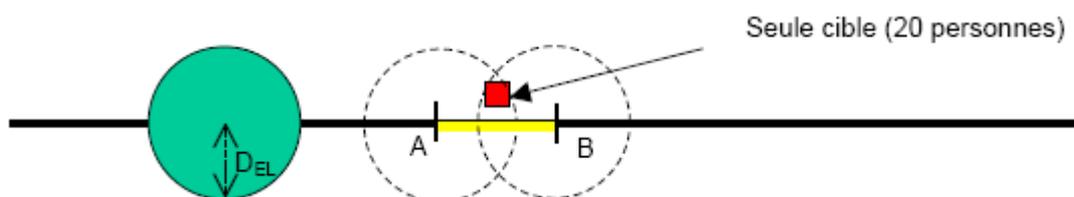
Il est possible d'affiner l'approche, selon la méthode suivante :

- séparer la tuyauterie en segments pour lesquels les sphères dont les centres sont sur ces segments mènent à une classe de gravité homogène (l'arrêté du 29 septembre 2005 ne prévoyant que 5 classes de gravité, on aura donc au maximum 5 groupes de segments)

- calculer la longueur cumulée de ces groupes de segments et obtenir un accident représentatif par classe de gravité rencontrée pour lequel la probabilité sera  $P_1 \times$  la somme des longueurs des segments menant à cette classe de gravité.

- Dans ce cas, on obtient au maximum 5 accidents par tuyauterie, chacun d'une classe de gravité différente.

Exemple :



Supposons qu'autour de la tuyauterie se trouvent 20 personnes (exposées) dans la zone des effets létaux, et aucune dans la zone des effets irréversibles.

Supposons que les cercles ainsi dessinés représentent les sphères d'un rayon égal aux distances des effets létaux  $D_{EL}$ .

Le segment [AB] de la tuyauterie représente l'ensemble des points pour lesquels la réalisation du phénomène dangereux conduira à des effets létaux impactant les 20 personnes "cibles", seules personnes présentes à une distance inférieure à  $D_{EL}$  (mais aussi  $D_{EI}$ ) de la tuyauterie. Le reste de la tuyauterie ne peut conduire à des effets létaux sur les cibles.

On peut alors présenter deux accidents représentatifs :

- un de probabilité égale à  $P_i$  x longueur du segment [AB], et de gravité " catastrophique " (entre 10 et 100 personnes exposées à des effets létaux)
- un de probabilité égale à  $P_i$  x (longueur de la tuyauterie – longueur du segment [AB]) et de gravité au plus " modérée "

### 3.2. Cas des tuyauteries " courtes " (par rapport aux distances d'effets engendrées)

C'est le cas le plus souvent rencontré dans les installations classées. Dans ce cas, pour simplifier, c'est l'ensemble de la longueur L de la tuyauterie qui contribue à la probabilité de fuite impactant tel ou tel point.

**On peut donc prendre  $P = P_i * L$ .**

Les zones d'effets correspondent là aussi à un continuum de sphères centrées sur tous les points de la tuyauterie, et donc à une zone allongée tout autour de la tuyauterie, comme dans le cas des tuyauteries longues.

La gravité est déterminée en prenant l'ensemble des personnes exposées dans les zones d'effets cumulées. Si cette méthode conduit à une situation trop difficile, on peut prendre une méthode similaire au cas des tuyauteries longues.

### 4. Aléa pour le PPRT :

L'aléa correspond au couplage des zones d'effets et des probabilités d'occurrence des phénomènes.

# Comme décrit ci-dessus, pour le **cas des tuyauteries longues**, un point de l'espace autour d'une tuyauterie longue ne peut être affecté par les effets d'un événement dangereux survenu sur cette tuyauterie que si cet événement se produit sur la section de la tuyauterie située à une distance du point inférieure à la distance maximale d'effet.

Cette section de tuyauterie est donc délimitée par l'intersection de la sphère centrée au point considéré et de rayon  $D_E$  = distance d'effet pour l'intensité de l'effet pris en compte ( $D_{EI}$ ,  $D_{EL}$ ,  $D_{ELS}$ ).

Cette section de tuyauterie mesure donc au maximum  $2D_E$  (soit  $D_E$  de part et d'autre du point s'il est situé sur la tuyauterie)

Conclusion : on peut ainsi entourer la tuyauterie d'une zone d'effet correspondant à un ensemble de sphères de rayon  $D_E$  glissant tout le long de la tuyauterie. Pour cette zone d'effets la probabilité de survenance en un de ses points de l'effet considéré (donc du phénomène dangereux) peut être raisonnablement majorée par :

$$P = P_l \times 2 \times D_E$$

-  $P_l$  étant la probabilité linéique pour la plage de tailles de brèche correspondant au type de fuite étudié (par exemple : de 0 à 15 mm, ou de 15 mm à la rupture), et pour le type de tuyauterie concerné (fonction du diamètre, et le cas échéant d'autres paramètres tels que le fluide véhiculé, l'âge, le niveau de sensibilité,...)

$D_E$  étant la distance d'effets correspondant aux effets " E " ( $D_{EI}$ ,  $D_{EL}$ ,  $D_{ELS}$ )

# De plus, pour simplifier les choses et éviter d'avoir des probabilités différentes en fonction du seuil d'effets considéré, la probabilité pourra être calculée sur la base de la distance des effets irréversibles ( $D_{EI}$ ) pour les différents seuils d'effets.

Dans le cas des **tuyauteries longues**, on a donc des **zones d'effets en longueur** (selon le seuil d'effets considéré), auxquelles sont associées les probabilités

$$P = P_l \times 2 \times D_{EI}$$

Dans le cas des **tuyauteries courtes**, on a une **zone d'effets en longueur** selon le même principe, à laquelle on peut associer la probabilité  $P = P_l \times L$ .

## 5. Cas particulier de l'UVCE et de l'inflammation d'un nuage en champ libre

Les inflammations de nuages de gaz présentent quelques particularités qu'il convient de prendre en compte. La proposition de modélisation est la suivante :

le phénomène dangereux se produira lorsque le nuage de gaz inflammable entrera en contact avec un point chaud. La zone d'effet de surpression sera alors une sphère centrée autour d'un point déterminé en fonction de l'encombrement et du modèle utilisé (cf. fiche UVCE, n° 3). La zone d'effet thermique est la partie du nuage s'enflammant (donc dont la concentration est comprise entre la LII et la LSI).

### Phénomène dangereux

La probabilité du phénomène dangereux sera ainsi obtenue en considérant les segments de la tuyauterie pour lesquels une fuite de gaz mènera à une concentration dangereuse (supérieure à la limite inférieure d'inflammabilité) au niveau du point chaud, et en multipliant cette longueur totale par la probabilité linéique.

## Accident représentatif

Le raisonnement est le même que celui présenté dans les parties précédentes, au calcul de la gravité près qui devra être évaluée de façon similaire à la description faite dans la fiche de représentation et cotation des phénomènes de dispersions atmosphériques et UVCE (fiche n° 5), à savoir en sommant la gravité due aux effets thermiques et la gravité due aux effets de surpression, sans pour autant compter en double les personnes exposées aux deux types d'effets.

## **Fiche n° 7 : EDD : Mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine**

L'objet de la présente fiche est de donner des éléments d'appréciation sur la prise en compte des mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine. Cette fiche n'a pas de caractère réglementaire et d'autres approches de ces mesures peuvent être acceptées sous réserve de justifications.

Sera considérée comme mesure de maîtrise des risques fondée sur une intervention humaine au sens de la présente fiche une mesure constituée d'au moins une activité humaine (une ou plusieurs opérations) qui s'oppose à l'enchaînement d'évènements susceptibles d'aboutir à un accident.

### **Notes :**

**1) la formation générale des agents, leur entraînement et les plans de secours généraux (type Plan d'Opération Interne, POI, et Plan Particulier d'Intervention, PPI) ne sont donc pas considérés comme mesure de maîtrise des risques à part entière.**

**2) les mesures d'interdiction formalisées (interdiction de fumer, interdiction des téléphones portables, plan de circulation...) sont traitées au chapitre 4.**

### **1. Règles générales**

#### **1.1 Conditions de prise en compte**

**Rappel :** L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation précise :

" Pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de maîtrise des risques doivent être **efficaces**, avoir une

**cinétique** de mise en œuvre en adéquation avec celle des événements à maîtriser, être **testées** et **maintenues** de façon à garantir la pérennité du positionnement précité". Par mesures de maîtrise des risques, on entend à la fois mesures techniques de maîtrise des risques ou mesures fondées sur les interventions humaines.

La vérification de ces quatre critères doit être réalisée par l'industriel dans l'étude de dangers. Cette démonstration est une condition nécessaire à la prise en compte de la mesure pour l'évaluation de la probabilité.

Ces quatre critères sont plus délicats à transposer au domaine des actions humaines par rapport aux mesures techniques. Néanmoins, il est possible de les retrouver dans les dimensions suivantes :

L'**efficacité** de la mesure prévue par rapport aux événements qu'elle est censée maîtriser : ce principe correspond à l'adéquation :

- d'une part, entre la tâche attribuée aux hommes et les exigences à satisfaire pour assurer la maîtrise des risques (conception de la mesure de sécurité) ;

- d'autre part, entre les moyens et les outils mis à disposition des hommes (outils, formation, documentation) et les caractéristiques, le dimensionnement de cette tâche (complexité, degré d'autonomie, fréquence, caractère programmé ou non, dimension collective, etc.), sans oublier les caractéristiques du contexte de réalisation (contrainte temporelle, dimensionnement du poste de travail, ambiances de travail, contexte physique et ergonomie du poste de travail, ressources techniques ou humaines prévues, etc.).

Cette efficacité est également conditionnée par l'adéquation de la cinétique de mise en œuvre de la mesure avec la cinétique des événements à maîtriser.

**Le maintien dans le temps** de l'efficacité de la mesure prévue et **le test ou la vérification** de son efficacité : dans le cadre de mesures incluant des actions humaines, les paramètres pesant sur la performance de la mesure de maîtrise des risques sont notamment le niveau des compétences du personnel et les conditions de travail. On peut citer également les exercices (une notion d'exercices planifiés / inopinés permet de différencier maintenance et test) ou l'analyse du retour d'expérience. Le maintien dans le temps de ces paramètres est normalement géré par l'organisation particulièrement à travers la formation. Le système de contrôle des performances du système doit permettre de vérifier que les conditions de l'efficacité de la mesure (pratiques opératoires et conditions matérielles de réalisation des actions de sécurité) sont correctement maintenues et gérées.

## **1.2. Eléments préalables et bonnes pratiques**

Préalablement à l'analyse des critères réglementaires évoqués dans cette fiche, il convient d'apporter une attention toute particulière :

- à la formation et l'habilitation des opérateurs chargés d'exercer l'intervention humaine identifiée comme mesure de sécurité ;
- à la bonne coordination des acteurs, la bonne communication entre les opérateurs précités lorsque la mesure fait appel à une action collective ;
- aux conditions de recours à la sous-traitance et à son encadrement (formation mais aussi bonne intégration dans les équipes pour les mesures faisant appel à une action collective).

Pour mémoire, d'autres éléments peuvent aussi peser sur la performance de ces mesures de sécurité : la conception et la modification des situations de travail, des facteurs économiques exogènes, etc.

## **1.3. Mesures de pré-dérive / Mesures de rattrapage de dérives**

De par leur nature, il est considéré que les mesures de maîtrise des risques intégrant une intervention humaine peuvent se classer en deux groupes :

- des mesures de pré-dérive qui ont vocation à prévenir un enchaînement non maîtrisé d'événements. Elles permettent donc de vérifier de façon systématique que les conditions de sécurité sont effectives avant de commencer une activité à risques (ex : vérification de la fermeture de la vanne avant de remplir un réacteur) ;
- des mesures de rattrapage de dérive qui prennent place au cours ou en aval de l'activité ou du procédé susceptible de présenter des risques d'accident majeur et dont la fonction de sécurité sera de détecter une dérive prévue et de revenir dans une plage de fonctionnement en sécurité et/ou d'agir en vue de limiter les effets du phénomène. Elles sont généralement mises en œuvre de manière beaucoup moins fréquente, et souvent dans une situation d'urgence (ex : intervention suite à alarme de pression haute).

Remarque : Les mesures de rattrapage de dérives peuvent se situer en amont de l'événement redouté central. Le plus souvent, l'événement redouté central n'est pas la dérive en elle-même mais est une des conséquences de son développement : un rattrapage de dérive peut alors se produire à la suite de la mise en œuvre d'une mesure de pré-dérive. La frontière entre mesures de pré-dérive et mesures de rattrapage de dérive sera alors en amont de l'événement redouté central dans " les nœuds papillons " lorsque cette représentation graphique est choisie.

## **2. Eléments d'appréciation des mesures de maîtrise des risques**

De manière générale, les critères mentionnés au paragraphe 1.1 peuvent être évalués suivant les considérations présentées dans le tableau ci-dessous.

<b>Critère</b>	<b>Type d'aspects à prendre en compte</b>
Efficacité	<p>Une fois que le bon dimensionnement de la mesure de maîtrise des risques est vérifié, les éléments d'appréciation de l'efficacité peuvent porter sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'adéquation des aptitudes du personnel chargé de l'action de sécurité par rapport à la tâche ;</li> <li>- l'adéquation et l'adaptation des outils et des interfaces de travail à l'opérateur ou ergonomie des outils et des interfaces : disponibilité et présentation des informations et de leur documentation (à traiter par l'opérateur ou donnant un retour sur les conséquences de son l'action de l'opérateur), accessibilité et manœuvrabilité des outils, adéquation de l'organisation (clarté des missions, de la définition des rôles et des responsabilités, etc.) ...</li> </ul>
Cinétique	<p>La notion de cinétique est pertinente pour le cas des mesures de maîtrise des risques consistant à intervenir suite à une dérive ou suite à un incident ou accident, ou plus largement, dans une situation de dérive c'est-à-dire dans un contexte de dynamique accidentelle.</p> <p>Cette notion est beaucoup moins pertinente pour le cas des mesures de maîtrise des risques consistant à intervenir en préalable d'une activité à risque, hormis des cas particuliers comme notamment la vérification d'une surépaisseur de corrosion d'une canalisation devant être réalisée à une fréquence adaptée à la vitesse de corrosion, et devant inclure le changement de la canalisation ou son by-pass.</p> <p>La cinétique de mise en œuvre d'une mesure de maîtrise des risques correspond au temps total sur l'ensemble des phases nécessaires à la réalisation de l'action de sécurité. En particulier dans les cas de surveillance de paramètres ou de ronde, il est nécessaire d'intégrer la fréquence de cette surveillance ou ronde en prenant en compte dans la cinétique de mise en œuvre de la mesure de maîtrise des risques la période de temps correspondante, c'est-à-dire la notion de cinétique intégrera la durée du contrôle et la durée de la période entre deux contrôles. De même, il est important de nuancer l'estimation de ce temps de mise en œuvre avec l'impact, sur cette cinétique, de la charge de travail des hommes, notamment la réalisation de plusieurs tâches en parallèle.</p>
Maintenabilité et testabilité (ou maintien dans le temps et vérification)	<p>Le maintien de la performance de l'intervention humaine peut s'apprécier à différents niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le maintien, par la formation, de la compétence du personnel chargé de l'action de sécurité : il peut nécessiter des recyclages réguliers, d'autant plus que les actions réalisées sont rarement mises en œuvre, ainsi que des exercices permettant de mettre en pratique les compétences acquises ;</li> <li>- le maintien, dans le domaine prévu, des conditions matérielles et organisationnelles nécessaires à la réalisation de la tâche.</li> </ul>

	<p>Ensuite, il est possible de tester et vérifier selon ces deux mêmes niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- par un contrôle (de connaissances/d'aptitudes) complémentaire à la formation initiale, que les enseignements de la formation sont bien applicables et appliqués par l'opérateur ;</li><li>- par l'ensemble des contrôles et audits, que les conditions matérielles et organisationnelles dans lesquelles les opérateurs agissent ne se sont pas dégradées ou n'ont pas évolué sans être gérées</li></ul>
--	---

**Note : il convient, par ailleurs, d'examiner avec attention les stratégies de maîtrise des risques basées sur un nombre important de mesures de maîtrise des risques dont le même opérateur est chargé. Ces situations imposent une forte sollicitation à l'opérateur tout en amenant à s'interroger sur les modes communs de défaillance (incompréhension par l'opérateur des informations, carence en formation, panique ou effet de surprise réduisant les capacités de l'opérateur sur toutes les actions qu'il a à mener, etc.).**

### **2.1. Eléments d'appréciation des mesures de pré-dérive**

Il conviendra d'apporter une grande attention à l'indépendance de la mesure par rapport à la conduite du processus industriel mis en œuvre (et à ses potentielles dérives) mais aussi par rapport aux autres mesures de réduction du risque à la source.

Note : Il conviendra par ailleurs, lors de la prise en compte d'une telle mesure, de vérifier que son action n'a pas déjà été intégrée dans le calcul de la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur. Les données tirées de l'accidentologie tiennent ainsi généralement compte de l'effet des mesures mises en place sur les sites.

**Règle proposée :** Les données et études disponibles sur l'intervention humaine et ses défaillances doivent conduire à considérer que :

- sauf justification particulière, les mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine, de la part de l'opérateur chargé du process par ailleurs, réduisent la probabilité d'une classe au maximum (ou ont un niveau de confiance maximal de 1 lorsque cette terminologie est choisie).

- sauf justification particulière, les mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine de la part d'un tiers par rapport à l'opérateur chargé du process (par exemple une vérification) réduisent la probabilité de deux classes au maximum (ou ont un niveau de confiance maximal de 2 lorsque cette terminologie est choisie).

Éléments complémentaires : ces mesures sont généralement des opérations ajoutées aux opérations normales d'exploitation du process. De par leur caractère préventif, l'existence d'une valorisation des comportements de sécurité ainsi qu'un contrôle régulier sur la réalisation de ces opérations s'avèrent importants en terme de maintien des performances dans le temps.

## **2.2. Éléments d'appréciation des mesures de rattrapage de dérive**

Il conviendra d'apporter une grande attention à **l'indépendance** de la mesure par rapport au processus industriel mis en œuvre (et à ses potentielles dérives) mais aussi par rapport aux autres mesures de maîtrise des risques.

**Règle proposée** : Les données et études disponibles sur l'action humaine et ses défaillances, notamment en situation anormale et dans des situations d'urgence pouvant susciter une tension inhabituelle, doivent conduire à considérer que :

- sauf justification particulière, les mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine réduisent la probabilité d'une classe au maximum (ou ont un niveau de confiance maximal de 1 lorsque cette terminologie est choisie).

Éléments complémentaires : Il conviendra de vérifier l'efficacité de l'intervention de l'opérateur et son exposition physique éventuelle liée à l'intensité des effets associés à ce dernier, en particulier : est-il prévu, si nécessaire, une protection physique de l'opérateur (EPI) ou un positionnement des moyens d'action ou d'information hors des zones d'effets?

Relativement à l'aspect de cinétique de mise en œuvre de la mesure de maîtrise des risques, il convient de vérifier que toutes les phases nécessaires à la mise en œuvre de la mesure sont prises en compte (temps nécessaire pour détecter la dérive, réaliser le diagnostic, revêtir si nécessaire un équipement de protection individuelle (EPI), ou déployer des moyens d'intervention, etc.).

Le contexte d'intervention de l'opérateur pour maîtriser une situation de dérive incidentelle ou accidentelle présente une difficulté fortement liée à la pression temporelle induite par le scénario.

Dans ce cas, la réussite de l'intervention de l'opérateur sera favorisée lorsque celui-ci disposera d'une marge de manœuvre temporelle suffisante pour analyser les informations, et prendre sa décision quant à l'action de sécurité à mener.

Enfin, les mesures d'intervention peuvent être très rarement, voire jamais, mises en œuvre. Dans ces cas, la réalisation d'entraînements pratiqués dans les conditions les plus similaires/représentatives des situations pouvant se présenter permettent de préparer l'opérateur à une intervention sur le scénario d'accident envisagé.

### **3. Cas des mesures intégrant un dispositif technique et une intervention humaine**

On considère des mesures du type : détection d'une dérive par un capteur, diagnostic par l'opérateur et déclenchement de vannes commandées.

La capacité de la mesure à remplir sa fonction de sécurité dépendra du bon enchaînement et du bon fonctionnement de l'ensemble des éléments techniques et organisationnels composant la mesure, au regard du scénario menant au phénomène dangereux puis éventuellement à l'accident.

Ainsi, la réduction de classe de probabilité ou le niveau de confiance à attribuer à la mesure sera la plus faible des réductions ou le plus faible des niveaux de confiance des différents composants pris individuellement (technique ou humain), après s'être assuré que les interfaces entre les différents composants ne sont pas susceptibles de réduire la performance de la mesure et que le temps de réponse global de l'ensemble des composants assurant la fonction de sécurité est compatible avec la cinétique des événements à maîtriser.

### **4. Cas spécifique des mesures d'interdiction**

Un nombre restreint de mesures d'interdiction stricte (interdiction de fumer, interdiction de franchissement d'une ligne pour des véhicules par exemple) peuvent être mises en œuvre au sein des installations classées.

Il paraît difficile, a priori, de définir de façon appropriée la fréquence de l'événement initiateur auquel la mesure de maîtrise des risques cherche à s'opposer (exemple: fumer, entrer dans la zone délimitée par la ligne au sol, etc.). On pourra donc forfaitairement considérer que cet événement initiateur a une classe de fréquence A. La mesure de maîtrise des risques d'interdiction absolue étant une mesure intervenant avant la dérive, elle pourra être cotée conformément aux règles décrites précédemment pour les mesures de pré-dérive (diminution d'une ou deux classe(s) de probabilité).

Rappel : pour les approches quantitatives, le passage de fréquence A en fréquence B se produit aux alentours de  $10^{-2}$ , soit un événement tous les 100 ans. Le passage de fréquence B en fréquence C se produit aux alentours de  $10^{-3}$ , soit un événement tous les 1000 ans.

Une exception pourra toutefois être retenue pour les permis d'intervention ou les permis de feu concernant des interventions directes sur des installations à grand potentiel de danger de type sphère d'ammoniac ou sphère de chlore. Ces interventions sont rares et le potentiel de danger de ces installations est généralement connu de tous. Lorsque ces mesures seront mises en œuvre, et sous respect de la démonstration explicite par l'exploitant dans l'étude de dangers que :

- l'existence et les modalités de respect de ces mesures sont connues des opérateurs,
- des dispositifs de contrôle du respect de ces mesures sont mis en place,
- toutes les mesures techniques ou organisationnelles complémentaires qui peuvent être judicieusement mises en place pour prévenir, complémentirement à l'obligation de permis d'intervention ou de permis de feu, les enchaînements redoutés auxquels l'interdiction cherche à s'opposer ont, soit été mises en place, soit fait l'objet d'une démonstration technicoéconomique de l'impossibilité de les mettre en place.

Il pourra être admis que l'événement initiateur correspondant à la mesure d'interdiction devra figurer dans les études de dangers, mais sans cotation de la probabilité et sans qu'il en soit tenu compte dans la probabilité de l'événement redouté central.

## **Fiche n° 8 : EDD : Traitement spécifique de certains événements initiateurs**

La réglementation issue de la loi du 30 juillet 2003 a introduit la prise en compte des probabilités dans le cadre de la maîtrise des risques s'appuyant sur l'évaluation des mesures de maîtrise des risques mises en œuvre par les exploitants (confrontée au retour d'expérience, REX). Il convient désormais de rechercher l'exhaustivité concernant les scénarios menant aux phénomènes dangereux et accidents dans le cadre de l'étude de dangers, et d'utiliser ces données à bon escient dans le cadre de l'évaluation du niveau de maîtrise des risques des installations.

L'annexe 4 de l'arrêté du 10 mai 2000 établit une liste d'événements externes susceptibles de conduire à des accidents majeurs pouvant ne pas être pris en compte dans l'étude de dangers en l'absence de règles ou instructions spécifiques.

Il s'agit " notamment " des causes suivantes :

- chute de météorite ;
- séismes d'amplitude supérieure aux séismes maximums de référence éventuellement corrigés de facteurs, tels que définis par la réglementation, applicable aux installations classées considérées ;
- crues d'amplitude supérieure à la crue de référence, selon les règles en vigueur ;
- événements climatiques d'intensité supérieure aux événements

historiquement connus ou prévisibles pouvant affecter l'installation, selon les règles en vigueur ;

- chute d'avion hors des zones de proximité d'aéroport ou aérodrome ;
- rupture de barrage visé par la circulaire 70-15 du 14 août 1970 relative aux barrages intéressant la sécurité publique ;
- actes de malveillance.

L'objet de la présente fiche est de définir une liste **non extensible** d'événements initiateurs qui pourront faire l'objet d'un traitement spécifique dans les études de dangers remises par les exploitants, qu'il s'agisse d'établissements relevant de l'arrêté du 10 mai 2000 modifié comme de ceux soumis à simple autorisation (non SEVESO).

Dans la plupart des cas, les événements initiateurs mentionnés dans cette fiche font l'objet d'une réglementation déterministe par ailleurs (arrêté ministériel pour la plupart). En cohérence avec cette approche déterministe, il sera considéré que le respect strict, intégral et justifié de cette réglementation permet de considérer qu'une démarche de maîtrise des risques importante a été menée et qu'il n'est pas opportun de les conserver pour mener la démarche décrite dans la circulaire du 29 septembre 2005 ainsi que pour la maîtrise de l'urbanisation. En revanche, il convient de les garder pour les plans d'urgence éventuels des établissements et installations.

Bien que le respect de la réglementation pour ces événements initiateurs constitue une démarche importante de maîtrise des risques, il pourra être proposé par l'exploitant ou demandé le cas échéant par l'administration de conduire une démarche de réduction complémentaire du risque à la source allant au-delà des exigences de la réglementation nationale au cours de l'existence de l'installation.

## **1. Règles générales et conditions de prise en compte**

L'étude de dangers remise par l'exploitant devra justifier de façon précise que la réglementation idoine est respectée.

L'analyse de risques prendra en compte cet événement initiateur ainsi que la ou les mesures de maîtrise des risques, qui sera en l'occurrence le respect de la réglementation correspondante, aux côtés d'autres éventuelles mesures de maîtrise des risques. En revanche, la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur ne sera pas évaluée et il ne sera pas tenu compte de cet événement initiateur dans la probabilité du phénomène dangereux, de l'aléa ou de l'accident correspondant.

## **2. Liste des événements initiateurs concernés**

Chacun des événements initiateurs est accompagné des éléments réglementaires ou bonnes pratiques applicables à ce jour. Toute évolution

de ces éléments et normes doit être prise en compte par l'exploitant pour démontrer sa conformité aux nouvelles références.

Événement initiateur	Éléments réglementaires ou bonnes pratiques à respecter
Séisme	Arrêté ministériel du 10 mai 1993 (en cours de révision)
Effets directs de la foudre	Arrêté ministériel du 28 janvier 1993, circulaire du 28 octobre 1996 (en cours de révision)
Crue	Dimensionnement des installations pour leur protection contre la crue de référence (telle par exemple que définie à ce jour dans le guide plan de prévention des risques inondations (PPRI) du MEDD).  Une attention particulière sera portée aux effets indirects (renversement de cuves, perte d'alimentation électrique, effet de percussion par des objets dérivants)
Neige et vent (pour les chutes et ruines structures)	Règles NV 65/99 modifiée (DTU P 06 002) et N 84/95 modifiée (DTU P 06 006)  NF EN 1991-1-3 : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-3 : actions générales - Charges de neige. (avril 2004)  NF EN 1991-1-4 : Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-4 : actions générales - Actions du vent. (novembre 2005)
Défaut métallurgique structure réservoir sous pression (non applicable aux tuyauteries)	Décret du 13 décembre 1999 modifié, relatif aux équipements sous pression, Arrêté du 21 décembre 1999 relatif à la classification et à l'évaluation de la conformité des équipements sous pression et arrêté d'application du 15 mars 2000 modifié relatif à l'exploitation des équipements sous pression  (Cf. détails ci-dessous)
Évènements conduisant à la détonation d'engrais simples solides à base de nitrate d'ammonium	Circulaires du 21 janvier 2002 et du 28 novembre 2005 + arrêté ministériel du 10 janvier 1994

### Détails relatifs au défaut métallurgique structure

Les phénomènes concernés décrivent la ruine instantanée d'une enceinte sous pression (hors tuyauteries) de gaz toxique, inflammable ou comburant, occasionnée par un défaut métallurgique de la structure lorsque la réglementation existante sur ce sujet est respectée.

L'événement initiateur de défaut ne sera donc pas évalué et il n'en sera pas tenu compte dans la probabilité du phénomène dangereux (et donc de

l'accident en découlant) sous réserve du respect des observations qui suivent :

- l'exploitant, dans le cadre de son système de suivi (par exemple système de gestion de la sécurité (SGS) pour les établissements AS et en application de l'article 4 l'arrêté ministériel du 10 mai 2000 modifié pour les établissements Seveso), a mis en place les moyens pour:

- S'assurer que l'enceinte fonctionne dans la gamme de paramètres pour lequel il a été conçu (température, pression, produit, ...)

- Contrôler que les spécificités de l'enceinte permettant la fonction de confinement et les organes de sécurité, sont correctement maintenues dans le temps. Pour cela un plan de suivi doit être établi par l'industriel précisant les moyens à mettre en place pour atteindre cet objectif. Dans le cas où ces moyens iraient au-delà de ceux prévus par la réglementation relative aux équipements sous pression, essentiellement ceux non soumis aux contraintes de la catégorie IV, ils sont prescrits par arrêté préfectoral. Il faut par ailleurs que ce plan de suivi fasse apparaître une durée de vie de l'enceinte, période au-delà de laquelle le maintien en service pour une nouvelle durée déterminée est soumis à un nouvel examen au moins aussi poussé que celui effectué lors de la mise en service. Cette durée est d'autant plus justifiée que le récipient, pour des raisons de processus industriel, ne serait pas soumis à visite intérieure, extérieure ou ré-épreuve régulière. Il pourra également être procédé au remplacement de l'enceinte lorsque l'examen pratiqué et le plan de suivi ne permettent pas de garantir le niveau de sécurité nécessaire.

Les autres causes de rupture d'une telle enceinte devront bien entendu être examinées et prises en compte dans l'étude de dangers (ruine suite à défaillance des supports de l'équipement, par exemple choc contre les pieds d'une sphère, utilisation de l'équipement hors de la gamme de paramètres pour lesquels il est conçu...).

## **Guide relatif aux principes généraux pour l'élaboration et la lecture des études de dangers des installations classées soumises à autorisation avec servitudes d'utilité publique (28 décembre 2006)**

**Avertissement** : ce document doit être lu à la lumière du glossaire relatif aux risques technologiques diffusé le 7 octobre 2005.

Il reprend, au fil du texte, les obligations réglementaires générales relatives aux études de dangers des installations soumises à autorisation avec servitudes d'utilité publique, dans le code de l'environnement, le

décret 77-1133 du 21 septembre 1977 modifié et l'arrêté ministériel du 10 mai 2000 modifié, mais ne tient pas compte des éventuelles réglementations sectorielles applicables. Des fiches visant à préciser certaines parties de ce document lui sont associées (dispersion atmosphérique de produits toxiques, BLEVE, UVCE, comptage des personnes pour la détermination de la gravité, hypothèse pour la cartographie des phénomènes de dispersion et leur cotation en probabilité-gravité, prise en compte des fuites sur les tuyauteries, mesures de maîtrise des risques fondées sur une activité humaine, traitement spécifique de certains événements initiateurs ...)

## **Objet d'une étude de dangers**

Les extraits, ci-dessous, de certaines exigences légales et réglementaires donnent l'esprit dans lequel les études de dangers doivent être réalisées.

*Art. L.512-1 du code de l'environnement (CE) :*

*« [L'étude de dangers] précise les risques auxquels l'installation peut exposer, directement ou indirectement, les intérêts visés au L.511-1 CE en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation. Le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation. En tant que de besoin, cette étude donne lieu à une analyse de risques qui prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents selon une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents. »*

Pour les installations soumises à autorisation avec servitudes, cette analyse de risques est indispensable. (cf. AM 10 mai 2000 modifié)

Elle a donc pour objet de rendre compte de l'examen effectué par l'exploitant pour caractériser, analyser, évaluer, prévenir et réduire les risques d'une installation ou d'un groupe d'installations situé dans un environnement industriel, naturel et humain défini, autant que technologiquement réalisable et économiquement acceptable, que leurs causes soient intrinsèques aux substances ou matières utilisées, liées aux procédés mis en œuvre dans l'installation, à la gestion de l'établissement ou dues à la proximité d'autres risques d'origine interne ou externe à l'installation.

*Décret 77-1133 modifié (art. 3,5°) :*

*« Elle justifie que le projet permet d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible,*

*compte-tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation. »*

*AM 10/05/2000 modifié (art 4) :*  
*« Elle expose les objectifs de sécurité poursuivis par l'exploitant, la démarche et les moyens pour y parvenir. Elle décrit les mesures d'ordre technique et les mesures d'organisation et de gestion pertinentes propres à réduire la probabilité et les effets des phénomènes et à agir sur leur cinétique.*

*Elle justifie les éventuels écarts par rapport aux référentiels professionnels de bonnes pratiques reconnus, lorsque ces derniers existent ou à défaut, par rapport aux installations récentes de nature comparable. Elle justifie que l'exploitant met en œuvre toutes les mesures de maîtrise du risque internes à l'établissement, dont le coût n'est pas disproportionné par rapport aux bénéfices attendus soit en termes de sécurité globale de l'installation, soit en termes de sécurité pour les intérêts visés à l'article L.511-1 CE ou de coût de mesures évitées pour la collectivité. »*

*Décret 77-1133 modifié (art. 3,5°):*

*« Le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation, compte-tenu de son environnement et de la vulnérabilité des intérêts mentionnés aux articles L. 211-1 et L. 511-1 CE. »*

Le choix de la méthode d'analyse utilisée est libre, mais celle-ci doit être adaptée à la nature et la complexité des installations et de leurs risques. Le soin apporté à leur analyse et à la justification des mesures de prévention, de protection et d'intervention doit être d'autant plus important que les conséquences des accidents possibles sont graves pour les personnes exposées ou l'environnement.

### **Articulation avec l'analyse de risques :**

Fondée sur les principes d'amélioration continue du niveau de sécurité des installations, et instruite par l'inspection des installations classées, l'étude de dangers est basée sur l'analyse des risques. Ses versions successives proposent ou prennent en compte les évolutions des installations et de leur mode d'exploitation, ainsi que les évolutions de l'environnement et des connaissances techniques et scientifiques, le cas échéant, notamment à l'occasion des réexamens imposés par la réglementation.

*AM 10/05/2000 modifié (art 4):*

*« L'analyse de risques, au sens de l'article L. 512-1 CE, constitue une démarche d'identification et de réduction des risques réalisée sous la*

*responsabilité de l'exploitant. Elle décrit les scénarios qui conduisent aux phénomènes dangereux et accidents potentiels. Aucun scénario ne doit être ignoré ou exclu sans justification préalable explicite. Cette démarche d'analyse de risques vise principalement à qualifier ou quantifier le niveau de maîtrise des risques, en évaluant les mesures de sécurité mises en place par l'exploitant, ainsi que l'importance des dispositifs et dispositions d'exploitation, techniques, humains ou organisationnels, qui concourent à cette maîtrise. Elle porte sur l'ensemble des modes de fonctionnement envisageables pour les installations, y compris les phases transitoires, les interventions ou modifications prévisibles susceptibles d'affecter la sécurité, les marches dégradées prévisibles, de manière d'autant plus approfondie que les risques ou les dangers sont importants. Elle conduit l'exploitant des installations à identifier et hiérarchiser les points critiques en termes de sécurité, en référence aux bonnes pratiques ainsi qu'au retour d'expérience de toute nature. L'étude de dangers contient les principaux éléments de l'analyse de risques, sans la reproduire. »*

L'analyse de risques peut être réalisée conjointement dans un objectif de sécurité des installations vis-à-vis du risque d'accident majeur (au sens de l'arrêté du 10 mai 2000 modifié) et du risque pour les travailleurs, les résultats étant ensuite repris respectivement dans l'étude de dangers et dans les documents requis par le code du travail.

*AM 10/05/2000 modifié (art 8) :*

*« les études de dangers sont établies en cohérence avec d'une part, la politique de prévention des accidents majeurs mentionnée à l'article 4 et d'autre part, le système de gestion de la sécurité prévu à l'article 7 ».*

*D 77-1133 modifié (art. 3,5°):*

*« Dans le cas des installations [AS], l'étude de dangers est réexaminée et, si nécessaire, mise à jour au moins tous les cinq ans, sans préjudice de l'application des dispositions de l'article 18 du présent décret. L'étude de dangers mise à jour est transmise au préfet».*

*AM 10/05/2000 modifié (art 4):*

*« L'étude de dangers mentionne le nom des rédacteurs et/ou des organismes compétents ayant participé à son élaboration. Pour les nouvelles demandes d'autorisation, l'étude de dangers est réalisée dans un document unique à l'établissement éventuellement*

*complété par des documents se rapportant aux différentes installations concernées. »*

Le fait que certains processus réglementaires dépendent de l'étude de dangers rend nécessaire que son contenu permette de :

- Autoriser et réglementer la ou les installations dont elle est l'objet après examen du caractère suffisant ou non du niveau de maîtrise des risques (en référence à la circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements dits « Seveso » visés par l'arrêté du 10 mai 2000 modifié) ;
- Procéder à l'information préventive sur les risques des tiers et des exploitants des installations classées voisines (pour la prise en compte d'éventuels effets dominos), ainsi qu'à la consultation du CHSCT ;
- Favoriser l'émergence d'une culture partagée du risque au voisinage des établissements dans le cadre de la mise en place de Comités Locaux d'Information et de Concertation (CLIC) ;
- Servir de base à l'élaboration des servitudes d'utilité publiques, des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) et à la définition de règles d'urbanisation ;
- Estimer les dommages matériels potentiels aux tiers ;
- Elaborer les plans d'urgence: les plans d'opérations interne (POI), les plans particuliers d'intervention (PPI) :

*D. 77-1133 (art. 3,5°):*

*« [L'étude de dangers] précise notamment, compte tenu des moyens de secours publics portés à sa connaissance, la nature et l'organisation des moyens de secours privés dont le demandeur [l'exploitant] dispose ou dont il s'est assuré le concours en vue de combattre les effets d'un éventuel sinistre. Dans le cas des installations [AS], le demandeur doit fournir les éléments indispensables pour l'élaboration par les autorités publiques d'un plan particulier d'intervention. »*

### **Contenu d'une étude de dangers**

Sans rappeler ici ni le détail des obligations réglementaires, ni les méthodes ou guides d'élaboration disponibles, toute étude de dangers doit s'appuyer sur une description suffisante des installations, de leur voisinage et de leur zone d'implantation. Elle doit présenter les mesures techniques et organisationnelles de maîtrise des risques et expliciter un certain nombre de points clés fondés sur une démarche d'analyse des risques :

- Description et caractérisation de l'environnement (et plans associés) ;
- Description des installations et de leur fonctionnement ;

- Présentation du système de gestion de la sécurité (SGS) et lien avec l'EDD ;
- Identification et caractérisation des potentiels de danger ;
- Réduction des potentiels de dangers ;
- Enseignements tirés du retour d'expérience (des accidents et incidents représentatifs) ;
- Evaluation des risques ;
- Caractérisation et classement des différents phénomènes et des accidents potentiels en termes d'intensité des effets des phénomènes, de gravité des conséquences des accidents, de probabilité et de cinétique de développement en tenant compte des performances des mesures de prévention et de protection ;
- Evolutions et mesures d'amélioration proposées par l'exploitant ;
- Représentation cartographique ;
- Résumé non technique de l'étude de dangers.

Les principaux points sont développés ci-dessous. Tous les points énumérés ci-dessus doivent être traités dans une étude de dangers, ceci n'en constitue pas pour autant un « plan type ».

## **1- Description et caractérisation de l'environnement**

Le périmètre couvert par l'étude de dangers doit être précisé (établissement complet ou unité(s)).

L'environnement du site doit être décrit, tant en tant que source potentielle d'agression (aléas naturels, installations voisines, voies de circulation...) que comme « cible » des effets engendrés par le site (occupation des sols, milieu naturel, installations voisines...). Ces descriptions doivent être accompagnées de cartes à une échelle adaptée.

La description des populations doit être menée de façon à permettre de déterminer la gravité des accidents (voir fiche n° 1 « Eléments pour la détermination de la gravité des accidents »).

Les aléas naturels de référence réglementaires (séisme, inondation...) doivent bien évidemment être décrits (en intensité, en fréquence et cinétique le cas échéant) pour être pris en compte comme source d'agression dans l'analyse de risques (voir fiche n° 8 « Traitement spécifique de certains événements initiateurs »).

## **2- Description des installations et de leur fonctionnement**

Cette description doit être accompagnée de tous documents cartographiques utiles à une échelle adaptée : cartes de localisation du site, des installations, plans de masse des installations (unités, stockages, postes et canalisations de transfert, aire d'attente des moyens mobiles de transport...), schéma des réseaux (incendie, eaux usées, utilités...) voire

plans relatifs à certaines dispositions (murs coupe-feu, réseaux de capteurs, rideaux d'eau..).

Les équipements sensibles internes au site seront mentionnés et positionnés sur les cartes (autres unités à risques avec effets dominos, salle de contrôle, équipements de lutte contre l'incendie tels que caserne, pomperie...).

### **3- Identification et caractérisation des potentiels de danger**

Les potentiels de danger des installations seront identifiés et caractérisés comme décrit en annexe 1, sans omettre ceux liés aux modes d'approvisionnement et d'acheminement des matières susceptibles d'être la cause d'accident (wagons, camions, tuyauteries.....), une source ou une cible d'effets domino. La localisation de ces potentiels sur une carte du site est recommandée (lieux de stockage et de mise en œuvre de matières dangereuses, ...).

Tous les équipements susceptibles en cas de défaillance de conduire à des effets de nature à porter atteinte aux intérêts visés à l'article L. 511-1 du code de l'environnement seront décrits.

### **4- Réduction des potentiels de danger**

**Un examen technico-économique visant à :**

- 1.** supprimer ou substituer aux procédés et aux produits dangereux, à l'origine de ces dangers potentiels, des procédés ou produits présentant des dangers moindres (propriétés des produits, conditions de procédés moins dangereuses, simplification du système... ) ;
- 2.** réduire le potentiel présent sur le site sans augmenter les risques par ailleurs (notamment modification des modes de stockages, d'approvisionnement du site ou des ateliers sans augmentation de la fréquence d'un risque lié au transport de matières dangereuses (TMD) ...). Une justification de la quantité de matière susceptible d'être présente sur site par rapport aux besoins du process peut s'avérer nécessaire, sera conduit et les principales conclusions seront fournies, en particulier en référence aux référentiels de bonnes pratiques (du secteur d'activité) s'ils existent.

L'exploitant motivera les choix techniques et économiques conduisant à envisager ou à poursuivre la mise en œuvre de substances dangereuses et de procédés présentant des dangers, notamment par comparaison aux meilleures techniques disponibles.

### **5- Enseignements tirés du retour d'expérience (des accidents et incidents représentatifs)**

Les événements pertinents relatifs à la sûreté de fonctionnement survenus sur le site et sur d'autres sites mettant en œuvre des installations, des substances et des procédés comparables seront recensés. L'étude de dangers précisera les mesures d'améliorations possibles (techniques et organisationnelles) que l'analyse de ces incidents, accidents ou accidents évités de justesse a conduit à mettre en œuvre ou à envisager, ainsi que les enseignements tirés du retour d'expérience positif sur les éléments/dispositifs qui ont « fait leurs preuves ».

Des éléments de statistique sur l'occurrence des phénomènes dangereux par type d'installation comparable pour les installations nombreuses peuvent être utiles pour les comparer à l'évaluation analytique de la probabilité sur le site. Ces éléments comporteront utilement la description des phénomènes et, si possible, des distances d'effets associés et des équipements concernés.

Une attention particulière sera apportée à la justification de la représentativité de ces éléments.

## **6- Evaluation des risques**

La méthodologie retenue dans l'étude de dangers pour analyser les accidents potentiels doit être explicitée dans celle-ci.

Lorsque le site est couvert par plusieurs études de dangers, l'exploitant doit s'assurer et s'engager sur l'exhaustivité du recensement des dangers présentés par les installations et leur analyse ainsi que sur la cohérence de ses études de dangers. En mentionnant la liste des études qui couvrent le site, il fait mention des effets dominos internes renvoyant le cas échéant et en tant que de besoin sur les diverses études.

L'analyse de risques, nécessaire pour les établissements classés Seveso, a fortiori AS, sera conduite sous la responsabilité de l'exploitant, par un groupe de travail multidisciplinaire regroupant a minima du personnel procédés, de la production, de la maintenance, du service sécurité ou assimilé, selon une méthode globale, adaptée aux installations et à leur contexte, proportionnée aux enjeux, itérative. Elle doit permettre d'identifier toutes les causes (1) susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine d'un accident majeur tel que défini par l'arrêté ministériel du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs et les scénarios correspondants (combinaisons pouvant y mener).

L'étude de dangers doit justifier que les conjonctions d'événements simples ont bien été prises en compte dans l'identification des causes d'accidents majeurs. La méthode de cotation (classification) des risques retenue, la grille de criticité choisie le cas échéant et utilisée pour la réalisation de l'analyse des risques ainsi que les règles de changement de classe (décote) de la probabilité d'occurrence ou/et de la gravité des

conséquences d'évènements redoutés en fonction des mesures de maîtrise des risques mises en place seront décrites et justifiées.

Les phénomènes de très grande ampleur, même de probabilité très faible (qui seront utilisés pour l'élaboration des plans de secours externes, PPI) doivent être pris en compte. Il est rappelé que pour ces phénomènes, il n'est pas tenu compte des mesures de maîtrise des risques. En revanche, il est tenu compte des limites physiques réalistes référencées par le retour d'expérience et dans les méthodes de calcul en usage (fraction de la quantité de nitrate d'ammonium impliquée dans une explosion ou de GPL impliquée dans un BLEVE ou de liquide inflammable dans un Boil-Over par exemple).

(1) AM 10/05/2000 :

*Certains événements externes pouvant provoquer des accidents majeurs peuvent ne pas être pris en compte dans l'étude de dangers et notamment, en l'absence de règles ou instructions spécifiques, les événements suivants :*

- *Chute de météorite*
- *Séismes d'amplitude supérieure aux séismes maximums de référence éventuellement corrigés de facteurs, tels que définis par la réglementation, applicable aux installations classées considérées. (les séismes d'amplitude inférieure restent des causes possibles, à examiner dans l'analyse de risques, et les installations doivent être dimensionnées en conséquence)*
- *Crues d'amplitude supérieure à la crue de référence, selon les règles en vigueur<sup>1</sup>*
- *Événements climatiques d'intensité supérieure aux événements historiquement connus ou prévisibles pouvant affecter l'installation, selon les règles en vigueur.*
- *Chute d'avion hors des zones de proximité d'aéroport ou aérodrome.*
- *Rupture de barrage visé par la circulaire 70-15 du 14 août 1970 relative aux barrages intéressant la sécurité publique.*
- *Actes de malveillance*

## **6.1- Analyse préliminaire**

En se basant sur les dangers identifiés à l'étape 3 et en confrontant aux données issues de l'accidentologie, l'exploitant réalise une première cotation des phénomènes identifiés (en probabilité, intensité des effets, cinétique de développement et le cas échéant gravité des conséquences des accidents correspondants).

Ce classement donne lieu à une identification de phénomènes nécessitant une analyse plus détaillée de tous les scénarios pouvant y conduire. Ceux

s'accompagnant d'effets de grande ampleur, quelle que soit leur probabilité, font l'objet d'une analyse de réduction complémentaire des risques à la source, fondée sur l'état de l'art, et ce, même s'ils n'ont pas été recensés dans l'accidentologie.

## **6.2- Etude détaillée de réduction des risques**

A partir des scénarios menant aux phénomènes et accidents nécessitant une analyse plus détaillée tels qu'identifiés dans l'étape précédente, une démarche itérative de réduction des risques à la source (2) sera menée jusqu'à atteindre un niveau de risque résiduel qui sera comparé aux critères cités dans la circulaire du 29 septembre 2005 (3).

Si cette démarche faisait apparaître de nouveaux scénarios qui n'auraient pas été identifiés dans la phase préalable, ceux-ci seraient alors réintroduits dans le processus d'analyse des risques.

**NB** : Le fait de tenir compte des mesures de maîtrise des risques ne signifie pas que leur fonctionnement est systématique : il convient de tenir compte également de leur possibilité de défaillance, avec la probabilité associée, et du phénomène (moins bien maîtrisé) qui peut en découler (et de l'accident correspondant) (4).

Les éléments de maîtrise des risques doivent être recensés et décrits dans l'étude de dangers, à savoir :

- les mesures de prévention adoptées à la conception et lors des modifications pour en réduire la probabilité d'occurrence ; les écarts justifiés par rapports aux bonnes pratiques (standards, règles professionnelles,...) ;
- les mesures de limitation des effets, de protection et d'intervention dont l'exploitant s'est assuré la maîtrise pour en limiter la gravité des conséquences sur les populations et sur l'environnement ou pour en ralentir la cinétique ;
- les dispositions de surveillance et de conduite appliquées pour l'exploitation afin d'anticiper les événements ;
- l'organisation et l'application du SGS et la simplicité des procédures et du fonctionnement.

Les performances des mesures de maîtrise des risques seront examinées avec un soin particulier, sans omettre l'analyse des modes communs de défaillance pour l'ensemble des phases d'exploitation des installations. Une justification proportionnée (en référence à l'article 4 de l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la

gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumis à autorisation) est fournie. Pour chaque phénomène (et chaque scénario susceptible d'y mener), l'équilibre entre les moyens de prévention, de limitation des effets et d'intervention retenus sera vérifié.

Cette démarche vise à supprimer les causes des événements redoutés ou en réduire la probabilité d'occurrence ou en réduire les effets par le choix de moyens prenant en considération les pratiques et techniques disponibles ainsi que leur économie.

Ces deux étapes, préliminaire et détaillée, sont très liées et ne sont pas nécessairement réalisées en deux temps. Elles font usuellement appel à des méthodes d'analyses différentes. Cette étude détaillée de réduction des risques aboutit à une seconde cotation des phénomènes identifiés comme critiques avec les mesures de maîtrise des risques retenues.

*(2) Mesures de prévention/limitation/protection/intervention susceptibles d'être mises en œuvre par l'exploitant à l'intérieur de son établissement pour réduire la probabilité ou les effets d'un phénomène.*

*(3) Cette circulaire permet aux services du préfet, ici l'inspection des installations classées, de porter un jugement sur le niveau de maîtrise du risque. Elle peut néanmoins servir de référence à l'exploitant dans sa démarche de réduction du risque.*

*(4) Par exemple, défaillance de l'ensemble détection+traitement de l'information+ fermeture automatique d'une vanne, menant à une dispersion de produit plus importante que si cette mesure avait fonctionné. Dans ce cas, deux phénomènes sont à examiner : la dispersion maîtrisée, avec la probabilité associée à la fuite, et la dispersion non maîtrisée, avec une probabilité plus faible, tenant compte de la probabilité de défaillance du système de détection-fermeture.*

## **7- Caractérisation et classement des différents phénomènes et accidents, tenant compte de l'efficacité des mesures de prévention et de protection**

Cette caractérisation des phénomènes et accidents doit être conduite en référence à l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

La réduction des risques jusqu'à « *atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation (art 3.5 du décret 77-1133 modifié)* » doit rester l'objectif à atteindre.

En tenant compte des mesures de maîtrise des risques dont les performances sont compatibles avec les scénarios conduisant aux phénomènes, mais aussi des cas de défaillance possibles et de la cinétique des événements envisagés sur l'ensemble des phénomènes dangereux résultant de l'analyse détaillée et représentatifs de la typologie des phénomènes possibles, l'étude de dangers :

- évalue les effets (types d'effets, distances) et conséquences (populations et autres intérêts visés au L.511-1 CE affectés...) et les probabilités d'occurrence des différents phénomènes et accidents correspondants, ainsi que leur cinétique ;
- présente un classement des accidents correspondants (positionnement dans la grille Gravité-Probabilité définie dans l'arrêté du 10 mai 2000 modifié) (5) ;

Tous les phénomènes susceptibles d'engendrer des effets à l'extérieur de l'établissement doivent être cotés et les accidents correspondants placés dans la grille.

*AM 10/05/2000 modifié*

*« L'étude de dangers doit contenir, dans un paragraphe spécifique, le positionnement des accidents potentiels susceptibles d'affecter les personnes à l'extérieur de l'établissement selon la grille (2) de l'AM ».*

L'ensemble des phénomènes et leurs caractéristiques (probabilité, intensité et cinétique de chacun de ces phénomènes) seront présentés dans une liste, sous la forme d'un tableau respectant le formalisme décrit en annexe 2. Ce tableau servira à l'établissement de la carte d'aléa, par l'inspection, en vue du PPRT. Il sera utile, pour les phénomènes susceptibles d'être écartés du PPRT, de mentionner les mesures de maîtrise des risques permettant d'appliquer les critères de l'annexe 2 de la circulaire du 3 octobre 2005.

En effet, l'étude de dangers est le document qui sert de base, notamment, à l'application par l'inspection des installations classées de la démarche décrite dans la circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements dits « SEVESO », visés par l'arrêté du 10 mai 2000 modifié, ainsi qu'à la détermination de l'aléa.

*(5) Dans l'étude de dangers, l'exploitant explicite le cas échéant la relation entre la grille figurant en annexe V de l'arrêté du 10 mai 2000 modifié et celles, éventuellement différentes, utilisées dans son analyse de risque.*

## **8- Représentation cartographique :**

L'étude doit fournir une cartographie des zones d'effets avec un jeu de cartes par type d'effet (thermique, toxique, surpression, et éventuellement projections). Chaque jeu comporte une carte par niveau de probabilité, représentant les zones délimitées par les seuils d'effets sur l'homme déterminés dans l'arrêté du 29 septembre 2005 pour les installations couvertes par l'étude de dangers (*maximum 5\*3 (voire 4, avec les projections) cartes de 3 à 4 courbes*).

Pour les établissements couverts par plusieurs étude de dangers, il est recommandé de produire également une carte globale pour l'établissement (et non uniquement par unité).

Afin de percevoir les possibles combinaisons d'effets, il est conseillé d'utiliser la même échelle pour les différents types d'effets. Dans la mesure du possible, il est conseillé d'éviter d'utiliser les mêmes couleurs que pour les cartes d'aléa.

On placera sur cette représentation les points à l'origine desquels sont tracées les distances d'effets.

## **9- Résumé non technique de l'étude de dangers**

*(D-77) « L'étude comporte, notamment, un résumé non technique explicitant la probabilité, la cinétique et les zones d'effets des accidents potentiels, ainsi qu'une cartographie des zones de risques significatifs. »*

Ce résumé fait apparaître, outre une description sommaire de l'activité de l'établissement, la situation actuelle résultant de l'analyse des risques et son évolution éventuelle (dans le cas d'installations existantes), sous une forme didactique. Le résumé comporte également une présentation du plan d'améliorations avec les délais.

Ce résumé est joint au dossier de demande d'autorisation ou à l'étude de dangers dans le cas d'une révision quinquennale.

Il comporte une cartographie relative aux effets des phénomènes dangereux telle que décrite au paragraphe 8.

Il présente également un classement des accidents dont les conséquences sur les personnes dépassent les limites de l'établissement en fonction de l'estimation de leur probabilité d'occurrence, de la gravité de leur conséquence, tenant compte de leur cinétique de développement, selon la grille annexée à l'arrêté du 10 mai 2000 modifié. Il distingue les accidents dont la probabilité est extrêmement faible ou dont la cinétique est suffisamment lente pour permettre la mise en œuvre de mesures de secours suffisantes pour la mise en sécurité des personnes.

Ces éléments seront fournis aux autorités respectivement en charge de l'élaboration des documents d'urbanisme, des plans de secours et de l'information du public. Ce résumé a vocation à être communiqué à des personnes non spécialistes, à être présenté au CLIC et à permettre une concertation en amont de l'élaboration du PPRT.

## **Annexe 1 : Identification et caractérisation des potentiels de danger**

***Lorsque cela sera pertinent dans le contexte de l'étude de dangers, l'exploitant fournira pour leur identification et leur caractérisation :***

- les quantités et caractéristiques pertinentes des produits, des sous-produits et des déchets susceptibles d'être présents, notamment les seuils et la situation par rapport à la nomenclature des installations classées (pour les révisions d'EDD, comparaison par rapport aux rubriques autorisées de l'établissement), les principales données (point éclair, tension de vapeur, seuils SELS, SEL et SEI, etc...) concernant ces produits, des sous-produits et des déchets leur localisation et leurs modalités de fabrication/stockage/ utilisation ;
- les fiches de données de sécurité des substances, produits, préparations... susceptibles d'être présents ou des tableaux de synthèses.
- une analyse de ces fiches sous forme de tableaux synthétiques faisant apparaître les phrases de risques R et S découlant de l'article 231-51 du Code du Travail,
- les caractéristiques pertinentes et l'ordre de grandeur des quantités d'éventuels produits de décomposition ou de combustion ainsi que des substances et matières susceptibles d'être générées par une dérive réactionnelle ainsi qu'une caractérisation des dangers correspondants ;
- un tableau faisant apparaître les incompatibilités entre les produits d'une part (y compris utilités), et entre les produits et les matériaux d'autre part;
- une description des dangers liés à la mise en œuvre de réactions chimiques et aux procédés opérés (exothermicité..) ainsi que les réactions secondaires susceptibles d'en découler ;
- pour les équipements dont la dangerosité n'est pas liée aux produits mais principalement aux conditions de fonctionnement tels qu'équipements à haute pression ou haute température, les

caractéristiques de ces équipements (température, pression de service et de calcul, vitesse de rotation pour les machines tournantes...).

Pour faciliter la perception des potentiels de dangers, susceptibles de provoquer des effets directs ou indirects sur les intérêts à protéger, l'exploitant les représentera sur un plan d'ensemble du site de l'usine et de son environnement sous une forme permettant une appréciation visuelle rapide de la situation et des effets « domino » potentiels.

Par ailleurs, une comparaison par rapport aux quantités autorisées par arrêtés préfectoraux, par rubrique de la nomenclature, pourra être utile.

### **A1. Exemple de tableau de classement des installations**





## **Annexe 2 : présentation des phénomènes dangereux ayant des effets externes à l'établissement en vue de la cartographie de l'aléa :**

Afin que l'Inspection des Installations classées puisse procéder la cartographie de l'aléa, il est demandé aux exploitants de présenter la liste des phénomènes dangereux dont les effets sortent de l'établissement (que ceux-ci atteignent des intérêts vulnérables ou non) susceptibles de survenir dans l'établissement sous la forme d'un tableur suivant les règles décrites ci-dessous, sans changer l'ordre des colonnes (exemple page suivante) :

**Colonne A** : n° du phénomène dangereux (arbitraire)

**Colonne B** : « commentaire » : description sommaire du phénomène (fuite isolée en 5 minutes sur cana 2", fuite au dépotage, feux de cuvette, BLEVE, Boil Over...) et de son lieu d'occurrence (bac x, réacteur y)

**Colonne C** : cotation de la probabilité du phénomène (selon l'échelle de A à E de l'arrêté du 29/09/2005)

**Colonne D** : type d'effet (thermique, toxique, surpression) : un phénomène ayant deux types d'effet (ex BLEVE : Effets thermiques et de surpression) apparaîtra donc deux fois dans le tableau : une ligne par type d'effet

**Colonne E** : distance correspondant au seuil des effets létaux significatifs par rapport au lieu d'occurrence du phénomène (= « danger très grave pour la vie humaine » tel que décrit à l'article L515-16 du CE)

**Colonne F** : distance (en mètres) correspondant au seuil des effets létaux par rapport au lieu d'occurrence du phénomène (= « danger grave pour la vie humaine » tel que décrit à l'article L515-16 du CE)

**Colonne G** : distance (en mètres) correspondant au seuil des effets irréversibles par rapport au lieu d'occurrence du phénomène (= « danger significatif pour la vie humaine » tel que décrit à l'article L515-16 du CE)

**Colonne H** : distance (en mètres) au seuil de 20 mbar pour les phénomènes engendrant des effets de pression. Si le phénomène ne provoque pas de surpression, indiquer une distance nulle

**Colonne I** : caractérisation de la cinétique, de manière binaire (rapide ou lente), sachant que s'il n'est pas possible de mettre à l'abri les personnes, la cinétique est considérée comme rapide

**Exemple de tableau de présentation des phénomènes (ici pour un site fictif, comportant deux établissements AS : SOO et PAK) :**

N° du PhD	Commentaire	Proba Indice	Type d'effet	Effet Très Grave	Effet Grave	Effet Significatif	Bris de Vitres	Cinetique
1	SOO-Incendie du Bac 1	E	thermique	40	55	80	0	Rapide
2	SOO-BOIL-OVER du Bac 1	E	thermique	200	350	430	0	Lente
3	SOO-Eclatement du Bac 1	E	surpression	25	60	180	360	Rapide
4	SOO-Incendie du Bac 2	E	thermique	40	55	80	0	Rapide
5	SOO-BOIL-OVER du Bac 2	E	thermique	200	350	430	0	Lente
6	SOO-Eclatement du Bac 2	E	surpression	25	60	180	360	Rapide
7	SOO-Incendie du Bac 3	D	thermique	40	55	80	0	Rapide
8	SOO-BOIL-OVER du Bac 3	E	thermique	200	350	430	0	Lente
9	SOO-Eclatement du Bac 3	E	surpression	25	60	180	360	Rapide
10	SOO-Incendie du Bac 4	D	thermique	40	55	80	0	Rapide
11	SOO-BOIL-OVER du Bac 4	E	thermique	200	350	430	0	Lente
12	SOO-Eclatement du Bac 4	D	surpression	25	60	180	360	Rapide
13	SOO-Incendie de la sous cuvette A	E	thermique	45	70	90	0	Rapide
14	SOO-Incendie de la sous cuvette B	E	thermique	45	70	90	0	Rapide
15	SOO-UVCE de la cuvette I et de la pomperie	E	surpression	45	75	95	190	Rapide
16	SOO-UVCE de la cuvette I et de la pomperie		thermique					
17	SOO-Incendie de la cuvette I et de la pomperie	E	thermique	55	100	180	0	Rapide
18	PAK-Explosion de l'atelier de CO	E	surpression	25	55	110	220	Rapide
19	PAK-Fuite ligne A atelier de CO	E	toxique	100	200	300	0	Rapide
20	PAK-Fuite ligne B atelier de CO	E	toxique	200	250	400	0	Rapide
21	PAK-Explosion de l'atelier NH3	D	surpression	25	55	110	220	Rapide
22	PAK-Fuite ligne A atelier NH3	D	toxique	100	200	300	0	Rapide
23	PAK-Fuite ligne B atelier NH3	D	toxique	200	250	400	0	Rapide
24	PAK-Fuite piquage bas Sphere CL2	E	toxique	100	200	250	0	Rapide
25	PAK-Rupture Canalisation I	E	toxique	100	200	300	0	Rapide
26	PAK-Rupture Canalisation II	E	toxique	150	250	350	0	Rapide
27	PAK-Explosion d'un cylindre de NH3	D	surpression	60	90	165	330	Rapide
28	PAK-Explosion d'un cylindre de NH3	D	toxique	50	80	100	0	Rapide
29	PAK-Rupture de la canalisation de conditionnement	E	toxique	100	200	350	0	Rapide

### Annexe 3 : Fiches complémentaires

N° de la fiche	Titre de la fiche
1	Eléments pour la détermination de la gravité des accidents
2	Dispersion atmosphérique
3	UVCE (fiche du GT GPL)
4	BLEVE (fiche du GT GPL)
5	Phénomènes de dispersion atmosphérique : représentation et cotation en probabilité/ gravité
6	Fuites de tuyauteries : représentation et cotation
7	Mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine
8	Traitement spécifique des certains événements initiateurs