

RAPPORT D'ÉTUDE
DRA-14-141835-08814A

30/03/2015

**Guide de détermination des effets dominos sur
l'enveloppe des engins de transport**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Guide de détermination des effets dominos sur l'enveloppe des engins de transport

Direction des Risques Accidentels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Frédéric MERCIER, Brigitte NÉDÉLEC, Emilie RASOOLY, Adrien WILLOT

PRÉAMBULE

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

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

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

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

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

| | Rédaction | Relecture | Vérification | | Approbation |
|---------|---|---|---|---|---|
| NOM | Adrien WILLOT Emilie RASOOLY | Ghislain BINOTTO | Mathieu REIMERINGER | Guillaume CHANTELAUVE | Stéphane DUPLANTIER |
| Qualité | Ingénieurs du pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures | Responsable du programme DRA-96 Direction des Risques Accidentels | Responsable Unité REST Direction des Risques Accidentels | Délégué Appui à l'administration Direction des Risques Accidentels | Responsable du pôle PHDS Direction des Risques Accidentels |
| Visa |  |  |  |  |  |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| 1. RESUME..... | 7 |
| 2. METHODE RETENUE - RESISTANCE DES ENGINES DE TRANSPORT A DES AGRESSIONS..... | 11 |
| 2.1 Contexte..... | 11 |
| 2.2 Typologie des engins de transport | 11 |
| 2.3 Choix des agressions | 13 |
| 2.3.1 Agressions..... | 13 |
| 2.3.2 Surpression | 13 |
| 2.3.3 Agressions thermiques | 17 |
| 2.3.4 Critères de vulnérabilité | 19 |
| 2.3.5 Forme des résultats : Détermination des abaques et de tableau de fiches techniques | 21 |
| 2.3.6 Détermination des distances d'effets dominos dans le cadre d'une infrastructure de transport..... | 22 |
| 3. RESULTATS OBTENUS - REPONSE DES ENGINES DE TRANSPORT | 28 |
| 3.1 Fiche technique - Conteneur maritime | 29 |
| 3.1.1 Descriptif détaillé | 29 |
| 3.1.2 Comportement à la surpression..... | 30 |
| 3.1.3 Distances aux effets dominos liés à la surpression | 32 |
| 3.1.4 Comportement aux agressions thermiques | 34 |
| 3.2 Fiche technique - Conteneur citerne maritime..... | 35 |
| 3.2.1 Descriptif détaillé | 35 |
| 3.2.2 Comportement à la surpression..... | 36 |
| 3.2.3 Distances aux effets dominos liés à la surpression | 37 |
| 3.2.4 Comportement aux agressions thermiques | 40 |
| 3.3 Fiche technique- Camion citerne contenant des substances chimiques à pression atmosphérique | 41 |
| 3.3.1 Descriptif détaillé | 41 |
| 3.3.2 Comportement à la surpression..... | 42 |
| 3.3.3 Distances aux effets dominos liés à la surpression | 43 |
| 3.3.4 Comportement aux agressions thermiques | 45 |
| 3.4 Fiche technique - Wagon citerne GPL..... | 46 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.4.1 | Descriptif détaillé..... | 46 |
| 3.4.2 | Comportement à la surpression | 47 |
| 3.4.3 | Distances aux effets dominos liés à la surpression..... | 48 |
| 3.4.4 | Comportement aux agressions thermiques | 50 |
| 3.5 | Fiche technique - Wagon citerne chimique..... | 52 |
| 3.5.1 | Descriptif détaillé..... | 52 |
| 3.5.2 | Comportement à la surpression | 54 |
| 3.5.1 | Distances aux effets dominos liés à la surpression..... | 55 |
| 3.5.2 | Comportement aux agressions thermiques | 57 |
| 3.6 | Fiche technique - Camion bâché type Tautliner | 58 |
| 3.6.1 | Descriptif détaillé..... | 58 |
| 3.6.2 | Comportement à la surpression | 59 |
| 3.6.3 | Distances aux effets dominos liés à la surpression..... | 59 |
| 3.6.4 | Comportement aux agressions thermiques | 61 |
| 3.7 | Fiche technique - Wagon bâché..... | 62 |
| 3.7.1 | Descriptif détaillé..... | 62 |
| 3.7.2 | Comportement à la surpression | 63 |
| 3.7.3 | Distances aux effets dominos liés à la surpression..... | 63 |
| 3.7.4 | Comportement aux agressions thermiques | 65 |
| 4. | EXEMPLE D'APPLICATION | 66 |
| 4.1 | Etude du comportement de l'enveloppe d'un engin de transport aux effets de surpression..... | 66 |
| 4.1.1 | Approche directe..... | 66 |
| 4.1.2 | Approche spécifique | 67 |
| 4.2 | Etude du comportement de l'enveloppe d'un engin de transport aux effets thermiques..... | 70 |
| 5. | CONCLUSION | 71 |
| 6. | REFERENCES..... | 73 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|--|----|
| FIGURE 1 ILLUSTRATION DU CHAMP DE L'ETUDE CONDUITE PAR L'INERIS POUR LA CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DE L'ENVELOPPE D'UN ENGIN DE TRANSPORT SOUMISE AUX EFFETS THERMIQUES ET DE SURPRESSION EN CHAMP LIBRE..... | 8 |
| FIGURE 2 : ONDE DE CHOC OU DETONATION | 14 |
| FIGURE 3 : DEFLAGRATION | 14 |
| FIGURE 4 : COURBE DE PRESSION ADMISSIBLE EN FONCTION DU TEMPS D'APPLICATION | 21 |
| FIGURE 6 : CONTENEUR MARITIME | 29 |
| FIGURE 7 : PRESSION DE RUPTURE EN DETONATION..... | 30 |
| FIGURE 8 : PRESSION DE RUPTURE EN DEFLAGRATION | 31 |
| FIGURE 10 : PRESSIONS DE RUPTURE D'UN CONTENEUR CITERNE | 36 |
| FIGURE 11 : CITERNE A DEUX ESSIEUX..... | 41 |
| FIGURE 12 : CITERNE A TROIS ESSIEUX | 41 |
| FIGURE 15 : WAGON CITERNE GAZ LIQUEFIE | 46 |
| FIGURE 16 : PRESSIONS DE RUPTURE – WAGON CITERNE GPL | 47 |
| FIGURE 17 : WAGON CITERNE CHIMIQUE | 52 |
| FIGURE 18 : WAGON CHIMIQUE LEGENDES DU TABLEAU 20 | 52 |
| FIGURE 19 : PRESSIONS DE RUPTURE – WAGON CITERNE CHIMIQUE | 54 |
| FIGURE 20 : CAMION BACHE DE TYPE TAUTLINER..... | 58 |
| FIGURE 21 : WAGON BACHE TYPE RILS R20 | 62 |
| FIGURE 22 : SCHEMA DE CONSTRUCTION D'UN WAGON BACHE | 62 |
| FIGURE 23 : EXEMPLE D'APPLICATION | 66 |

1. **RESUME**

Ce document présente une méthode d'étude du comportement de l'enveloppe des engins de transport vis-à-vis des agressions accidentelles en vue de les exploiter dans les analyses de risques pour la prise en compte des effets dominos.

Les agressions accidentelles considérées sont :

- des explosions (détonations et déflagrations) ;
- des effets thermiques transitoires : phénomènes de type boule de feu et feu éclair (ou feu de nuage, flash fire) ;
- des effets thermiques continus sous forme de rayonnement.

La réponse des engins de transport est analysée sous les aspects suivants :

- pour les explosions en termes de :
 - Glissement suivi de renversement,
 - Renversement si blocage,
 - Rupture ;
- pour les phénomènes thermiques en termes de :
 - Température de propagation d'incendie,
 - Température de rupture de cuve,
 - Température admissible dans le fluide pour éviter une dilatation excessive.

Des abaques permettent de qualifier la réponse de l'enveloppe des engins en fonction des signaux d'entrée considérés pour les différentes agressions.

Les conséquences induites ne sont néanmoins pas étudiées. Autrement dit, les phénomènes dangereux engendrés par la perte de confinement de l'engin de transport ne sont pas modélisés dans la mesure où ceux-ci dépendent de la taille de brèche et de l'environnement où se situe l'engin.

Afin de permettre l'applicabilité de ce guide dans le cadre des Étude De Dangers relatives aux infrastructures de transport telles que gare de triage/port maritime ou fluvial/ parking Poids Lourds, des scénarii accidentels enveloppes identifiés dans ce type d'installation, selon l'arrêté du 18 décembre 2009, ont été appliqués aux différents engins de transport figurant dans ce rapport.

Ainsi, une première série de modélisation en champ libre du comportement des engins de transport soumis aux effets en provenance des scénarii types, a permis de déterminer des distances conservatives aux effets dominos afin de prévenir leur occurrence sur des engins de transport.

Le tableau et la figure suivants exposent le périmètre de la présente étude réalisée par l'INERIS vis-à-vis de la caractérisation du comportement de l'enveloppe des engins de transport soumis aux effets dominos de surpression et thermiques.

Les résultats du comportement de l'enveloppe des engins de transport étudiés aux effets thermiques et de surpression sont présentés sous forme de fiches techniques.

Dans cette étude, l'INERIS contribue essentiellement à la caractérisation du comportement de l'enveloppe de l'engin de transport cible soumis aux effets thermiques et de surpression.

L'INERIS ne modélise pas de phénomène dangereux en cas de perte de confinement de l'engin de transport.

La figure ci-après illustre par un exemple, le champ de l'étude réalisée par l'INERIS.

| Champ de l'étude | | Hors champ de l'étude |
|---|--|--|
| Agresseur externe | Engin de transport cible | Phénomène dangereux |
|  |  |  |
| <p>BLEVE d'un camion-citerne de GPL</p> | <p>Etude du comportement de l'enveloppe d'un wagon-citerne de GPL en champ libre soumis aux effets thermiques et de surpression issus d'un BLEVE d'un camion citerne</p> | <p>La perte de confinement occasionnée par la perte de l'intégrité de l'enveloppe du wagon-citerne de GPL soumis aux effets dominos en provenance d'un BLEVE d'un camion de GPL, peut conduire à un éclatement du wagon-citerne.</p> <p>Le phénomène dangereux en cas de perte de confinement n'est pas étudié dans la présente étude. Car la survenance d'un phénomène dangereux dépend de la dimension de perte de confinement (petite fuite, fuite moyenne, rupture de l'enveloppe) et également des conditions présentes dans l'environnement dans lequel survient l'événement accidentel. L'analyse des risques permettra de retenir ou pas la survenance du phénomène dangereux.</p> |

Figure 1 Illustration du champ de l'étude conduite par l'INERIS pour la caractérisation du comportement de l'enveloppe d'un engin de transport soumise aux effets thermiques et de surpression en champ libre

| Sources des agresseurs retenus | Effets communs étudiés aux différentes sources | Typologie des engins | Analyse du comportement de l'enveloppe des engins type cibles Critères de vulnérabilité de l'enveloppe |
|--|--|---|---|
| Effets issus d'installations fixes ou d'engins de transport notamment des scénarios types de l'arrêté du 18 12 2009 ¹ | <p>Thermiques</p> <p>En fonction des phD^2</p> <ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement continu $8kW/m^2$ -Rayonnement transitoire $1800 (kW/m^2)^{4/3} \cdot s$ -Feu de nuage (taille du nuage) | <p>Effets appliqués sur des engins de transport types représentatifs des modes de transport : routier, ferroviaire et portuaires</p> <ul style="list-style-type: none"> -Conteneur maritime ; -Conteneur-citerne maritime ; -Camion-citerne ; -Camion bâché - type Tautliner ; -Wagon-citerne chimique ; -Wagon-citerne gaz liquéfiés ; -Wagon bâché | <p>Conteneurs maritimes, wagons et camions bâchés – Détermination de la limite à ne pas dépasser pour éviter la propagation d'un incendie à l'intérieur de l'enveloppe qui se traduit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • par une élévation de température de $140^\circ C$ à ne pas dépasser en paroi interne <p>/Conteneurs-citernes, camions-citernes, wagons-citernes</p> <p>Détermination de limites à ne pas dépasser par le contenu et son enveloppe pour ne pas compromettre l'intégrité de l'enveloppe de la citerne</p> <p>Ne pas dépasser :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une élévation de température supérieure à $35^\circ C$ dans le liquide en interne • une élévation de température supérieure à $500^\circ C$ pour l'enveloppe |
| | <p>Surpression</p> <p>En fonction des PHD étudiés</p> <ul style="list-style-type: none"> - Détonation - Déflagration <p>En prenant en compte le temps d'application de 20ms à 1s</p> | | <p>Détermination du comportement de l'enveloppe soumise à une pression maximale de l'onde de souffle avec un temps d'application de la pression sur l'enveloppe vis-à-vis :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Glissement • Renversment • Rupture <p>Avec :</p> <p>Domaine A : Tenue de l'engin</p> <p>Domaine B : Rupture de l'engin</p> |

Tableau 1 : Etude du comportement de l'enveloppe des engins de transport aux effets dominos thermiques et de surpression en champ libre

¹ Arrêté du 18/12/2009 relatif aux critères techniques et méthodologiques à prendre en compte pour les études de dangers des ouvrages d'infrastructures de transport où stationnent, sont chargés ou déchargés des véhicules ou des engins de transport contenant des matières dangereuses

² PhD : Phénomène Dangereux

2. METHODE RETENUE - RESISTANCE DES ENGINES DE TRANSPORT A DES AGRESSIONS

2.1 CONTEXTE

Pour qualifier plus précisément la résistance de l'enveloppe des engins de transport aux agressions résultant d'accidents en provenance d'installations voisines ou d'autres engins de transport, il était intéressant de développer une méthode prenant en compte les éléments de construction réglementaires constituant les engins transportant des marchandises dangereuses.

L'actuelle approche forfaitaire retenue pour étudier les effets dominos sur les infrastructures, de 200mbar pour les effets de surpression et de 8 kW/m² pour les effets thermiques est une approche prudente qui ne prend pas en compte le temps d'application des effets thermiques et de surpression. Cette approche n'est pas représentative de la tenue de l'enveloppe des engins de transport contenant des marchandises dangereuses, conçu selon les exigences réglementaires pour le transport de marchandises dangereuses en fonction de la dangerosité de la matière et du mode de transport. Le type de matériau, l'épaisseur de l'enveloppe, la tenue à la pression maximale de service exigée pour les contenants, les équipements constitutifs des contenants (vannes, soupape, événements...) contribueront à la tenue de l'enveloppe des engins de transport aux agressions externes thermiques et de surpression.

2.2 TYPOLOGIE DES ENGINES DE TRANSPORT

Les engins de transport pouvant transporter des marchandises dangereuses sont nombreux et très variés, il est toutefois possible de les regrouper par familles, et, au sein de ces familles, par type. Dans ce qui suit, les engins de transport étudiés sont les suivants :

- conteneur maritime ;
- conteneur-citerne maritime ;
- camion-citerne ;
- camion bâché (type Tautliner) ;
- wagon-citerne chimique ;
- wagon-citerne gaz liquéfiés ;
- wagon bâché.

Les caractéristiques mécaniques et géométriques des différents engins étudiés sont les plus communément rencontrées sur les sites de type gare de triage, port maritime,...

Un descriptif détaillé des caractéristiques structurelles de chaque engin de transport étudié est présenté dans une fiche technique. Par ailleurs, cette fiche

technique présente les résultats du comportement de l'enveloppe de chaque engin de transport étudié aux effets thermiques et de surpression.

Le comportement des engins de transport sera étudié à vide et en charge.

On notera qu'au regard de la configuration du stationnement temporaire par l'empilement des conteneurs maritimes au sein d'un port, il s'avère nécessaire de prendre en compte dans l'analyse des effets des conteneurs « tampons » entre le conteneur source et le conteneur cible. Ces travaux contribuent à la détermination de règles de séparation entre matières dangereuses pour l'organisation du stationnement temporaire sur un terminal portuaire tant pour les effets de surpression que pour les effets thermiques. Cette approche n'est pas détaillée dans le présent rapport.

2.3 CHOIX DES AGRESSIONS

2.3.1 AGRESSIONS

Deux types d'effets ont été considérés pour les agressions impactant les engins de transport :

- surpression ;
- thermique.

Les paramètres liés à ces effets sont détaillés ci-après.

On notera que les effets de projections ne sont pas pris en compte dans ce guide.

2.3.2 SURPRESSION

Les engins de transport étudiés ont été soumis à deux types d'onde de surpression :

- le premier type d'onde est une **détonation**. Ce type d'explosion correspond à un éclatement de réservoir ou à des explosifs solides. Le profil de pression est une onde de choc avec une durée de phase positive t_+ variable dont la durée est liée à la quantité mise en jeu. Cette onde est modélisée à l'aide de l'équation suivante :

$$p(t) = \begin{cases} \Delta P_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) & \text{si } t \leq t_+ \\ 0 & \text{si } t > t_+ \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

- le deuxième type d'onde est une **déflagration**, correspondant à l'explosion d'un nuage gazeux en milieu industriel. Le modèle employé dans l'étude considère la déflagration comme un signal triangulaire isocèle. Cette onde est modélisée à l'aide de l'équation suivante :

$$p(t) = \begin{cases} (2 \cdot \Delta P_{\max} / t_+) \cdot t & \text{si } t \leq t_+ / 2 \\ (-2 \cdot \Delta P_{\max} / t_+) \cdot t + 2 \cdot \Delta P_{\max} & \text{si } t > t_+ / 2 \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Avec :

ΔP_{\max} , pic de surpression

t, temps d'application

t_+ , durée de la phase positive

Ces modèles d'onde ont été retenus pour être en adéquation avec les modèles employés dans le cadre des études de vulnérabilité du bâti vis-à-vis des effets de surpression dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (INERIS, CETE NC, 2008).

L'exploitation des conséquences de surpression sur les structures peut être réalisée en termes de l'impulsion positive. L'impulsion positive est définie comme l'aire sous la courbe de pression de la phase positive, ainsi :

- Dans le cas de la détonation :

$$I_+ = \frac{\Delta P_{\max} \cdot t_+}{2}$$

- Dans le cas de la déflagration :

$$I_+ = \frac{2\Delta P_{\max} \cdot t_+}{\pi}$$

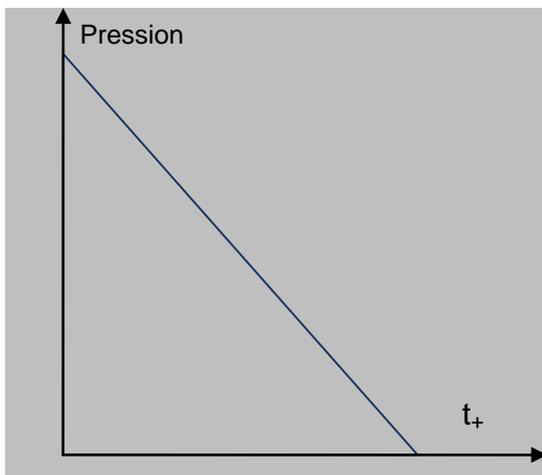


Figure 2 : Onde de choc ou détonation

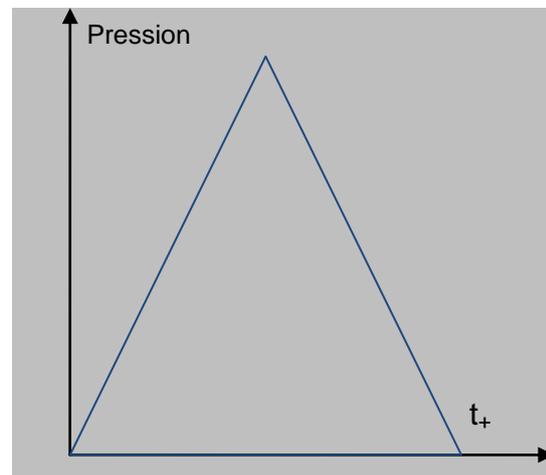


Figure 3 : Déflagration

Les différents engins de transport de cette étude ont été considérés comme des coques minces sur lesquels un flambage (ou flambement) circonférentiel dû au passage de l'onde de surpression est possible.

D'un point vu physique, le flambage est un phénomène d'instabilité d'une structure qui se produit lorsqu'un léger accroissement du chargement entraîne des déformations importantes qui peuvent conduire à la ruine de la structure. Suite à l'apparition du flambage, les déformations ne peuvent plus être supposées infiniment petites et négligées. La charge limite où se produit le flambage est appelée charge critique de flambage.

L'étude de la croissance d'un défaut géométrique initial jusqu'à une taille critique associée à l'apparition de la plasticité a permis le développement d'un modèle de prédiction du flambage de réservoirs métalliques.

Deux types de flambage de l'enveloppe de l'engin de transport sont observables :

- Flambage élastique : la déformation de l'enveloppe sous l'effet de la pression est réversible ;
- Flambage plastique : la déformation de l'enveloppe sous l'effet de la pression est irréversible.

Le flambage plastique a été retenu dans le présent rapport pour être la limite de la tenue de l'enveloppe qui soit représentative de la rupture de l'enveloppe des contenants étudiés.

Notons que dans le cas du BLEVE, deux niveaux de remplissage sont considérés pour les installations mobiles :

- un niveau de remplissage de 10 % qui correspond à une maximisation des effets de pression en cas d'éclatement ;
- un niveau de remplissage de 85 % qui correspond à une maximisation des effets thermiques en cas d'éclatement.

Dans le cas des feux de nuage, l'encombrement lié à la géométrie de l'engin de transport tendrait à augmenter localement les niveaux de surpression. Néanmoins ce phénomène reste très difficile à prendre en compte, et les dommages supplémentaires liés à l'encombrement du nuage autour de l'engin n'ont pas été pris en compte. Autrement dit, on considère que l'onde de surpression s'applique uniformément sur les parois de l'engin de transport.

| Type d'explosion | Type produits ou installation | Masse / Volume inflammable | Temps d'application ms |
|--|---|---|------------------------|
| UVCE en champ libre | Gaz Inflammables Liquides inflammables (Déflagration) | < 400 g (5 m ³) | 0-20 |
| | | 400 g (5 m ³) – 5 kg (65 m ³) | 20-50 |
| | | 5 kg (65 m ³) – 50 kg (650 m ³) | 50-100 |
| | | 50 kg (650 m ³) – 150 kg (2 000 m ³) | 100-150 |
| | | 150 kg (2 000 m ³) – 50 t (650 000 m ³) | 150-1000 |
| | | >50 t (650 000 m ³) | >1000 |
| UVCE en milieu encombré | Gaz Inflammables Liquides inflammables (Déflagration) | < 5 kg (65 m ³) | 0-20 |
| | | 5 kg (65 m ³) – 100 kg (1300 m ³) | 20-50 |
| | | 100 kg (1300 m ³) – 700 kg (9 000 m ³) | 50-100 |
| | | 700 kg (9 000 m ³) – 2.5 t (32 000 m ³) | 100-150 |
| | | 2.5 t (32 000 m ³) – 750 t (10 000 000 m ³) | 150-1000 |
| BLEVE (onde de choc) | Inst. mobile | 20 -150 m ³ (remplissage à 10 %) | 20-40 |
| | | 20 -150 m ³ (remplissage à 85 %) | 10-25 |
| Eclatement réservoir (onde de choc) | Hydrocarbures | < 1 000 m ³ | à 20 |
| | | 1000 à 100 000 m ³ | 20 à 100 |
| | | > 100 000 m ³ | 100 à 150 |
| Explosion de solide (onde de choc) | Engrais | < 650 kg | 0 à 20 |
| | | 650 kg à 85 t | 20 à 100 |
| | | 85 t à 285 t | 100 à 150 |
| | | 285 t à 10 000 t | 150 à 500 |
| | | > 10 000 t | > 500 |
| | Explosifs (kg ou t éq. TNT) | < 20 kg | 0 à 20 |
| | | 20 gkg à 2,5 t | 20 à 100 |
| | | 2,5 t à 8,5 t | 100 à 150 |
| | | 8,5 t à 300 t | 150 à 500 |
| | | > 300 t | > 500 |

Tableau 2 : Explosions considérées

Le Tableau 2 traduit les types d'explosion considérés auxquels les engins de transport étudiés seront soumis. Il est basé sur l'annexe A2 du cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression (INERIS, CETE NC, 2008).

Il figure également en Annexe 2 de la circulaire du 4 mars 2010 relative aux études de dangers remises en application de l'article L551-2 du code de l'environnement.

Ce tableau fournit un ordre de grandeur des temps d'application des agressions à envisager compte tenu de types de produits et de volumes caractéristiques de l'explosion d'engins de transport. Cela permet d'avoir une première approximation des temps d'application à considérer dans le cadre de l'évaluation des effets dominos dans une étude de dangers infrastructure de transport (gare de triage, ports, parking PL,...).

L'emploi de la valeur supérieure de la plage de temps d'application est sécuritaire.

Ces temps d'application pourront être affinés pour les UVCEs (explosion de nuage du gaz ou de vapeur inflammables en espace non confiné).

2.3.3 AGRSSIONS THERMIQUES

2.3.3.1 INTRODUCTION

Concernant les agressions thermiques, les engins de transport étudiés ont été soumis à trois types de phénomènes :

1. Un rayonnement continu. Ce rayonnement résulte d'un phénomène thermique continu de type feu de nappe, incendie, feu torche...qui n'impacte pas directement la cible. Un phénomène est considéré comme continu si sa durée excède 2 minutes.
2. Un rayonnement transitoire pour un BLEVE (signal de forme triangulaire) ou un Boil Over classique, couche mince ou une pressurisation de bac (signal de type créneau) :
 - dans le cas du BLEVE, le phénomène accidentel résulte de la rupture de réservoirs remplis de gaz liquéfié inflammable. Une boule de feu se forme alors. Le rayonnement qui lui est associé traduit le développement de cette boule de feu, son élévation et sa disparition ;
 - dans le second cas (Boil Over, pressurisation de bac), on considère également une valeur de rayonnement thermique émis par une boule de feu. Les modèles classiques présentent ce rayonnement comme persistant pendant toute la durée du phénomène.
3. Un feu de nuage (ou feu éclair) qui caractérise le phénomène d'inflammation d'un nuage gazeux sans effets de surpression. Ses effets se font par contact direct entre le nuage et la structure. Les structures sont généralement peu affectées par un tel phénomène. Ses effets les plus importants sont sur les êtres humains pris dans un tel phénomène pour lesquels les atteintes peuvent se produire par des brûlures externes, mais également par des atteintes internes, au niveau des poumons notamment.

A la différence de la surpression, la réponse des différents engins de transport n'a pas été étudiée pour l'ensemble des signaux :

- Vis-à-vis des phénomènes thermiques transitoires de type BLEVE, le guide dans sa version actuelle présente le comportement de l'enveloppe de chaque engin de transport lorsqu'il est soumis à un niveau d'intensité égal

au SELS¹. Le principal enseignement de cette étude est que hormis pour les véhicules bâchés, l'ensemble des engins de transport résiste au rayonnement thermique induit par un BLEVE au SELS. Il s'agit à présent de caractériser le pic de flux maximal admissible pour chaque engin de transport vis-à-vis de volumes de capacité de transport de référence. En effet, la durée d'un signal de BLEVE est uniquement conditionnée par le volume du stockage du terme source. Ce guide ayant pour objectif d'être mis en œuvre pour le traitement des Etudes De Dangers infrastructures, des volumes de capacité de transport caractéristiques d'engins de transport seront naturellement étudiés en priorité. Cette étape n'a pas encore été réalisée mais pourra faire l'objet de futurs développements dans le cadre de l'élaboration de ce guide évolutif.

- Les phénomènes thermiques continus sont abordés dans ce guide pour un seuil d'intensité fixé à 8 kW/m². Ainsi, pour chaque typologie d'engin de transport, une durée maximale d'exposition a été calculée pour ce niveau d'intensité. Il convient à présent de réaliser cette démarche pour une gamme de densité de flux allant de 2 à 200 kW/m².
- Pour les phénomènes thermiques transitoires de type feu de nuage, le guide indique pour chacun des engins, la durée limite admissible dans une flamme de température 1500°C. On notera que les cas où le contact entre la flamme et la cible était direct ont été exclus.

2.3.3.2 VALEURS SEUILS

L'arrêté du 29 septembre 2005² retient les valeurs suivantes pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m² ou 600 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets irréversibles délimitant la "zone des dangers significatifs pour la vie humaine" ;
- 5 kW/m² ou 1000 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets létaux délimitant la "zone des dangers graves pour la vie humaine" mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement ;
- 8 kW/m² ou 1800 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets létaux significatifs délimitant la "zone des dangers très graves pour la vie humaine" mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement.

Pour des expositions qui perdurent (temps supérieur à deux minutes), les seuils d'effets ne dépendent pratiquement plus du temps. On se réfère alors aux seuils des effets thermiques en termes de densité de flux thermique.

Lors d'un phénomène dangereux thermique transitoire (**temps inférieur à deux minutes**), le calcul de la dose thermique DT se fait en intégrant la densité de flux thermique à chaque pas de temps, soit :

¹ SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs

² 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

$$DT = \int_{t=0}^T [\phi(t)]^4 \cdot dt \quad \text{Eq. 3}$$

Pour le feu de nuage, les valeurs seuils fixées ("GPL", 2006) sont liées à la taille du nuage :

- 1,1 x la distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII), seuil des effets irréversibles délimitant la "zone des dangers significatifs pour la vie humaine" ;
- Distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII), seuil des effets létaux et seuil des effets létaux significatifs ;

Dans le cadre du présent document, le comportement des structures sera analysé sur la base des seuils qui viennent d'être exposés. L'impact des seuils appliqués sur les structures se fait en employant des modèles thermiques classiques.

Notons que pour le camion citerne et le camion bâché, le risque de propagation d'incendie lié à l'inflammation du tracteur et des pneus, n'a pas été pris en compte dans le cadre de cette étude. Les matériaux utilisés pour les pneus et la cabine présentent en effet un risque d'inflammation lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement thermique. En cas d'inflammation, la propagation de l'incendie pourrait augmenter considérablement le flux thermique transmis au chargement de la remorque.

2.3.4 CRITERES DE VULNERABILITE

Le tableau ci-dessous indique pour chacun des engins de transport les critères de vulnérabilité considérés vis-à-vis des agressions de type thermique et surpression.

| Type d'engin de transport | Critère de vulnérabilité | |
|---------------------------------------|--|---|
| | Aux effets de surpression | Aux effets thermiques |
| Conteneur maritime | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le glissement suivi du renversement ○ Le renversement seul (blocage au sol) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | En face interne : Elévation de température supérieure à 140°C |
| Conteneur citerne maritime | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le glissement suivi du renversement ○ Le renversement seul (blocage au sol) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | <ul style="list-style-type: none"> ○ Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne ○ Elévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe |
| Camion citerne | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le glissement suivi du renversement ○ Le renversement seul (blocage au sol) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | <ul style="list-style-type: none"> ○ Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne ○ Elévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe |
| Wagon citerne chimique | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le renversement seul (blocage par les rails) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | <ul style="list-style-type: none"> ○ Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne ○ Elévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe |
| Wagon citerne de gaz liquéfié | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le renversement seul (blocage par les rails) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | <ul style="list-style-type: none"> ○ Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne ○ Elévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe |
| Camion bâché de type Tautliner | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le glissement suivi du renversement ○ Le renversement seul (blocage au sol) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | En face interne : Elévation de température supérieure à 140°C |
| Wagon à bâchage mécanique | <ul style="list-style-type: none"> ○ Le renversement seul (blocage au sol) <ul style="list-style-type: none"> ○ La rupture | En face interne : Elévation de température supérieure à 140°C |

Tableau 3 : Critères de vulnérabilité

2.3.5 FORME DES RESULTATS : DETERMINATION DES ABAQUES ET DE TABLEAU DE FICHES TECHNIQUES

2.3.5.1 VOCABULAIRE EMPLOYEE

2.3.5.1.1 SURPRESSION

Les résultats sont communiqués en termes de pression maximale admissible en fonction des temps d'application de référence :

- 20 ms,
- 50 ms,
- 100 ms,
- 150 ms,
- 500 ms,
- 1s.

Ainsi les résultats sont fournis sous forme d'abaque dont une représentation symbolique est indiquée ci-dessous :

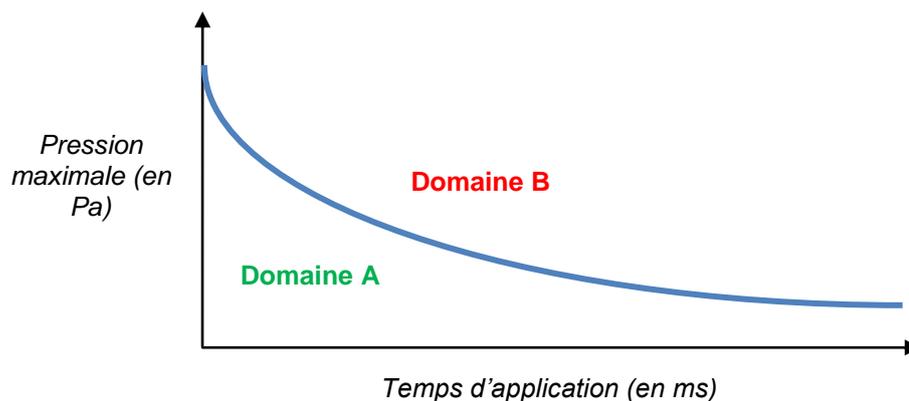


Figure 4 : Courbe de pression admissible en fonction du temps d'application

Cette courbe de couleur bleue correspond aux niveaux de pression admissible en fonction du temps d'application de la surpression considérée et du type d'explosion (onde de choc ou déflagration). Ainsi, l'abaque ci-dessus contient deux domaines :

- Le domaine A correspond à des signaux admissibles pour l'engin de transport au regard du mode de défaillance étudié (renversement, glissement ou rupture de l'enveloppe).
- Le domaine B correspondant aux points situés au-dessus de la courbe de pression admissible, permet de déterminer l'ensemble des signaux de surpression pour lesquels l'engin de transport est vulnérable.

Rappel des unités de pression

1 bar = 10^5 Pa (Pascal)

1 mbar = 10^2 Pa

Ou

1 Pa = 10^{-5} bar

Dans le cas de la rupture des engins de transport cylindrique (wagon citerne,...), les résultats sont fournis sous la forme d'un abaque Pression – Impulsion dont les domaines fonctionnent comme indiqués précédemment. Le calcul de l'impulsion est réalisé suivant les formules du paragraphe 2.3.2.

2.3.5.1.2 RAYONNEMENT CONTINU

Les résultats sont présentés en termes de durée d'exposition à un flux de 8 kW/m².

2.3.5.1.3 RAYONNEMENT TRANSITOIRE (BLEVE ET BOIL OVER)

Les résultats sont présentés en termes de tenue à une dose thermique de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s.

2.3.5.1.4 FEU DE NUAGE

Les résultats sont présentés en termes de taille de nuage à partir de laquelle une atteinte de l'engin de transport intervient.

2.3.6 DETERMINATION DES DISTANCES D'EFFETS DOMINOS DANS LE CADRE D'UNE INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

2.3.6.1 INTRODUCTION

Ce guide a également pour objectif de contribuer à l'organisation du stationnement temporaire des différents engins pouvant être présents sur une infrastructure de transport pour éviter les effets dominos entre engins de transport.

Ainsi les phénomènes enveloppes à prendre en compte pour chaque type d'infrastructure ont été mis en corrélation avec les résultats issus des modèles de réponse mécaniques des engins. Cela a permis à l'INERIS de déterminer des distances aux effets dominos entre engins de transport en champ libre.

Ce chapitre vise tout d'abord à exposer les différents phénomènes types pris en compte pour les infrastructures de transport. Le chapitre suivant expliquera la manière dont les distances aux effets dominos entre engins de transport sont déduites.

2.3.6.2 PHENOMENES TYPES SUR UNE INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

L'arrêté du 18 décembre 2009 « relatif aux critères techniques et méthodologiques à prendre en compte pour les études de dangers des ouvrages d'infrastructures de stationnement, chargement ou déchargement de matières dangereuses », définit dans son annexe 1 les événements types à prendre en compte pour chaque type d'infrastructure suivant :

- Aires routières de stationnement ouvertes à la circulation publique et au stationnement de véhicules de transport de MD ;
- Gares de triage ou faisceaux relais ;
- Ouvrages des Ports maritimes, fluviaux et plates-formes multi-modales.

L'INERIS a réalisé l'ensemble des modélisations des phénomènes associés aux événements types de l'arrêté du 18 décembre 2009 du 26/02/2010.

Il est à noter que les modélisations des événements types ont été réalisées sous l'hypothèse d'un encombrement moyen pour les effets de surpression de :

- 4 m de hauteur pour le stationnement de poids lourds ;
- 4 m de hauteur de trains ;
- 13 m de hauteur pour l'empilement de conteneurs maritimes.

Ces phénomènes sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

| Phénomène | Produit phare | Mode de conditionnement | Conditions de libération du potentiel de danger |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Explosion de matière condensée | Explosifs de division 1.1D | Conteneur de 16 tonnes de masse nette de matière explosible | Explosion d'explosifs |
| | Explosifs de division 1.3G | Conteneur de 16 tonnes de masse nette de matière explosible | Explosion d'explosifs |
| BLEVE | Hydrocarbures gazeux en mélange liquéfiés nsa (GPL) n° ONU 1965 | Citerne de 20 tonnes | Rejet instantané |
| BLEVE | Hydrocarbures gazeux en mélange liquéfiés nsa n° ONU 1965 (GPL) | Wagon-citerne de 57 tonnes | Rejet instantané |
| VCE | Hydrocarbures gazeux en mélange liquéfiés nsa (GPL) n° ONU 1965 | Citerne de 20 tonnes | Brèche d'un diamètre de 5 mm |
| | | | Brèche d'un diamètre de 20 mm |
| | | | Brèche d'un diamètre de 80 mm |
| | | | Rupture totale |
| VCE | Hydrocarbures gazeux en mélange liquéfiés nsa n° ONU 1965 (GPL) | Wagon-citerne de 57 tonnes | Brèche d'un diamètre de 5 mm |
| | | | Brèche d'un diamètre de 20 mm |
| | | | Rupture totale |
| Explosion de solide | Engrais au nitrate d'ammonium n° ONU 2067 | Conteneur de vrac de 27 T ou en GRV souple de 500 kg | Rupture totale |

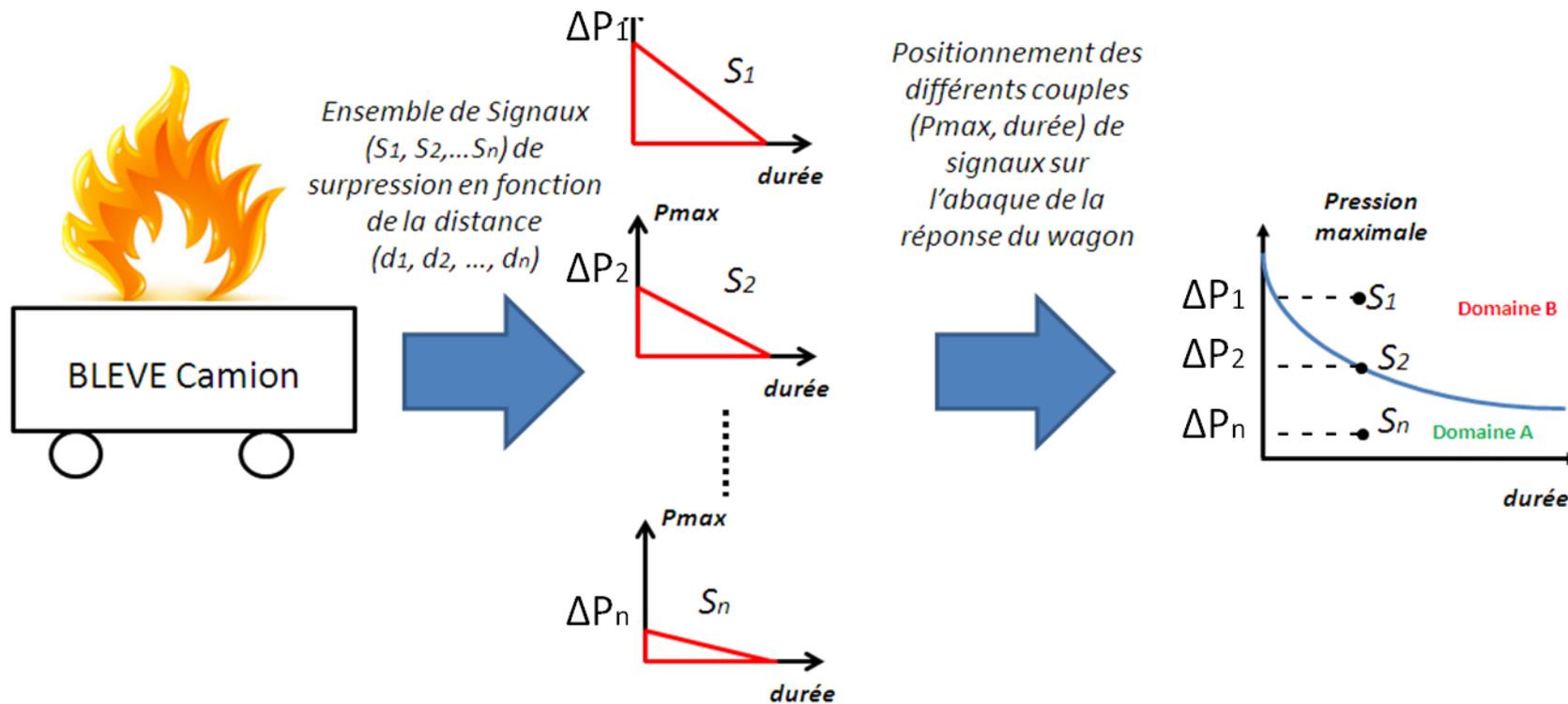
Tableau 4 : Phénomènes types sur une infrastructure de transport

2.3.6.3 DETERMINATION DES DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS ENTRE ENGINES

A partir des modélisations des phénomènes types de l'arrêté du 18 décembre 2009, l'INERIS a calculé pour chaque phénomène dangereux les signaux thermiques et de surpression pour toutes les distances. Ces signaux ont ensuite été positionnés dans l'abaque traduisant le comportement de l'enveloppe de l'engin de transport à la sollicitation considérée. Cette démarche a permis d'identifier un signal limite et donc une distance minimale à respecter pour laquelle on atteint le mode de défaillance de l'engin de transport.

Cette méthodologie est également traduite par le schéma ci-dessous. Il s'agit par exemple de déterminer la distance aux effets dominos **en champ libre** à respecter pour que l'enveloppe d'un wagon citerne ne se rompe pas sous l'effet de surpression issu d'un BLEVE de camion citerne de GPL.

Pour chaque engin de transport, deux tableaux sont présentés dans le présent rapport, le premier prenant uniquement en compte la plastification de l'enveloppe, et le second en retenant la valeur maximale sur les 3 modes de défaillance considérés (rupture, renversement et glissement).



Conclusion : La rupture de la coque du wagon citerne n'est plus observée à partir du signal S_2 . La distance d_2 correspondante est donc la distance à respecter pour qu'il n'y ait pas de propagation entre le camion citerne susceptible de blever et le wagon citerne.

Figure 5 : Schéma représentant la méthodologie mise en œuvre par l'INERIS pour le calcul des distances **en champ libre** aux effets dominos

Après avoir identifié :

- les barrières techniques et organisationnelles ;
- la probabilité de l'occurrence des phénomènes dangereux ;
- la gravité.

Ces distances pourront ensuite être exploitées dans le cadre de l'étude de dangers :

- lors de l'analyse des risques ;
- ou pour définir, le cas échéant, une re-disposition des engins de transport.

3. RESULTATS OBTENUS - REPONSE DES ENGIN DE TRANSPORT

Dans ce chapitre sont présentés, par fiche technique propre à chaque engin de transport étudié, les résultats du comportement de l'enveloppe aux effets thermiques et de surpression.

Chaque fiche technique est constituée comme suit :

- Descriptif détaillé de l'engin étudié
- Comportement de l'enveloppe à la surpression et distances aux effets dominos vis-à-vis des événements types de l'arrêté du 18 décembre 2009
- Comportement de l'enveloppe aux effets thermiques

On notera que chaque fiche technique « engin de transport » de ce guide est autoportante et peut donc être lu et utilisé indépendamment des autres.

3.1 FICHE TECHNIQUE - CONTENEUR MARITIME

3.1.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le conteneur maritime considéré est similaire à celui de la Figure 6. Ses caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau 5.



Figure 6 : Conteneur maritime

| | | |
|----------------|------------------|----------------------------|
| Extérieur | Longueur | 20 pieds (6,058 m) |
| | Largeur | 8 pieds (2,438 m) |
| | Hauteur | 8,5 pieds (2,591 m) |
| Intérieur | Longueur | <i>dry acier</i> (5,905 m) |
| | Largeur | 2,33 m |
| | Hauteur | 2,38 m |
| Epaisseur (mm) | Paroi et toit | 3 |
| | Plancher | 6 |
| Masse (t) | A vide / A plein | 3,5 / 30 |
| Matière | Acier St 37-2 | |

Tableau 5 : Caractéristiques conteneur maritime 20 pieds

3.1.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a mené des modélisations pour les 3 modes de défaillance (Renversement, glissement ou rupture de l'enveloppe). Les résultats de ces calculs indiquent que la rupture de la paroi du conteneur serait le premier mode de défaillance constaté pour des niveaux de surpression supérieurs à 15 mbar (1 500 Pa).

La modélisation du comportement de la coque est basée sur l'hypothèse que les éventuelles marchandises présentes à l'intérieur du conteneur sont conditionnées en colis. Ainsi, la valeur de la pression de tenue de la coque n'est pas influencée par le contenu. On en déduit que le taux de remplissage considéré n'a aucun effet sur les résultats de pression admissible calculés pour le mode de défaillance « rupture de la paroi ». En revanche, cette hypothèse n'est pas juste lorsqu'il s'agit de caractériser le comportement d'un engin de transport au renversement ou au glissement.

En statique, la plastification des parois s'opère à partir de 20 mbar. Les modélisations ont également permis de déterminer les courbes suivantes donnant la pression de rupture en fonction de la durée de la phase positive.

- Onde de choc

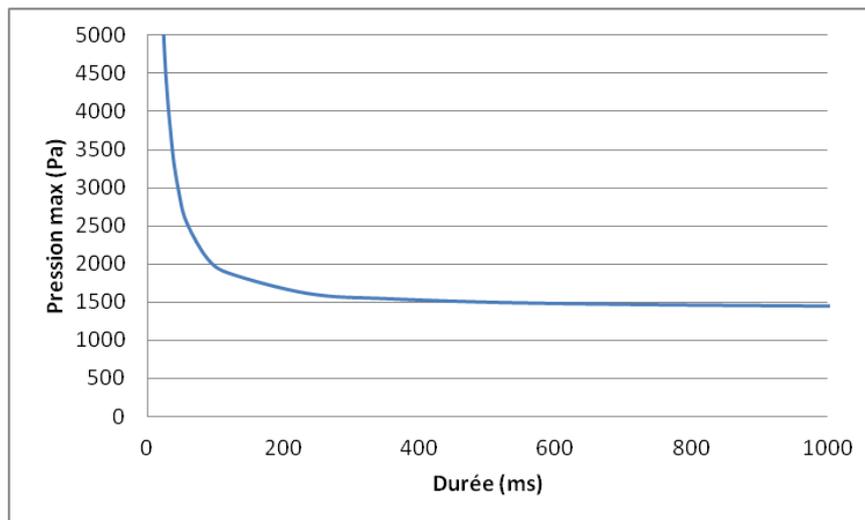


Figure 7 : Pression de rupture en détonation

Exemple : on observera la déformation élastique des parois du conteneur maritime si une onde de choc d'une pression de 1600 Pa est appliquée pendant une durée supérieure à 100ms.

- Déflagration

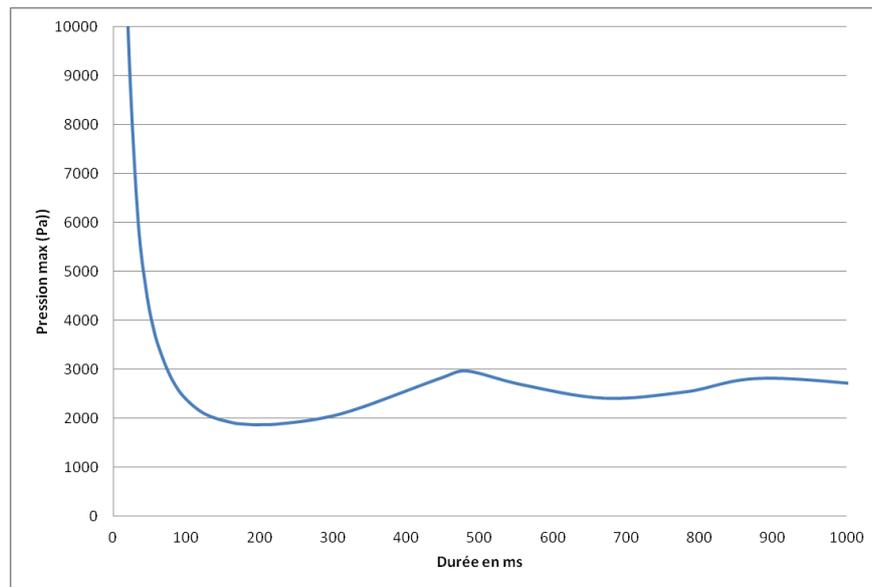


Figure 8 : Pression de rupture en déflagration

Exemple : on observera la plastification des parois du conteneur maritime si une déflagration de pic de surpression de 20 mbar (2 000 Pa) est appliquée pendant une durée supérieure à 200 ms.

Les modélisations réalisées ont également montré que pour des signaux de surpression équivalents aux seuils limites de plastification de coque exposés sur les courbes ci-dessus, le conteneur était susceptible de glisser sur une distance comprise entre 3 et 5 mètres.

3.1.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

3.1.3.1 RUPTURE OU PLASTIFICATION DE L'ENVELOPPE

Les abaques ci-dessus ont permis de définir l'ensemble des signaux de pression pour lesquels il y a rupture ou plastification de l'enveloppe du conteneur maritime.

Les distances aux effets dominos en champ libre vis-à-vis des événements types de l'arrêté du 18 décembre 2009 ont ainsi pu être calculées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Rupture de l'enveloppe) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T - 5mm | VCE GPL 20T ou 57T - 20mm | VCE GPL 20T ou 57T - 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Conteneur maritime vide / plein | 350 | 245 | 30 | 55 | 5 | 25 | 300 | 1800 | 3320 | 55 |

Tableau 6 : Plastification de l'enveloppe – Conteneur maritime

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1 000 m et à la dizaine supérieure pour des distances au delà de 1 000 m.

3.1.3.2 TOUS MODES DE DEFAILLANCE CONFONDUS

Les distances aux effets dominos en champ libre ont également été estimées en considérant uniquement le renversement puis le glissement à 5 m comme modes de défaillance

Le tableau ci-dessous indique les distances aux effets dominos calculées en considérant l'ensemble de ces modes de défaillance. Autrement dit, les distances aux effets dominos associées à chaque mode de défaillance ont été comparées, et la valeur maximale a été ici sélectionnée :

| Distances aux effets dominos en m (Tous modes de défaillance confondus) | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Conteneur maritime plein | 350 | 245 | 30 | 55 | 10 | 25 | 75 | 1800 | 3315 | 55 |
| vide | 350 | 245 | 30 | 55 | 10 | 25 | 230 | 1800 | 3320 | 55 |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Rupture | Rupture | Rupture | Rupture | Renversement- Glissement | Rupture | Rupture | Rupture | Rupture | Rupture |
| Mode de défaillance majorant (vide) | Rupture | Rupture | Rupture | Rupture | Renversement- Glissement | Rupture | Glissement | Rupture | Rupture | Rupture |

Tableau 7 : Distances aux effets dominos – Conteneur maritime

Les distances ont été arrondies au cinquième supérieur pour des distances comprises entre 0 et 1000 m, à la dizaine supérieure pour des distances au delà de 1000 m.

3.1.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

La réponse du conteneur aux agressions thermiques est synthétisée dans le tableau ci-après.

| Contenu | Phénomène | Seuil étudié | Effets |
|---------|------------------------------------|--------------|--|
| Vide | Flux continu | SELS | Au bout de 19 minutes |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Sans effet |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 160 mètres |

Tableau 8 : Résultats des durées d'exposition limites aux phénomènes thermiques

Trois types de sollicitation thermique ont donc été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, le critère fondé sur l'augmentation de température en paroi interne (cf. 6.3.2), est atteint au bout de 19 minutes.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le conteneur est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 2.3.3.2.
- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la durée limite d'exposition à la flamme était de 2,5 secondes. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation est de 160 m.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du conteneur maritime à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues. Les modélisations réalisées ci-dessus indiquent que le conteneur maritime peut être disposé à 120 mètres du camion porteur 47 m³ sans risquer d'effets dominos en cas de BLEVE de ce dernier (Tableau 9).

| Type de contenant | 1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s | 1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s | 600 (kW/m ²) ^{4/3} .s |
|------------------------------|---|---|--|
| BLEVE Camion-citerne de 20 T | 120 | 170 | 210 |

Tableau 9 : Distances aux effets thermiques (en mètres) de BLEVE de réservoir mobile de propane ou butane

3.2 FICHE TECHNIQUE - CONTENEUR CITERNE MARITIME

3.2.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le conteneur citerne maritime considéré est similaire à celui de la Figure 9. Ses caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau 10.



Figure 9 : Conteneur citerne maritime

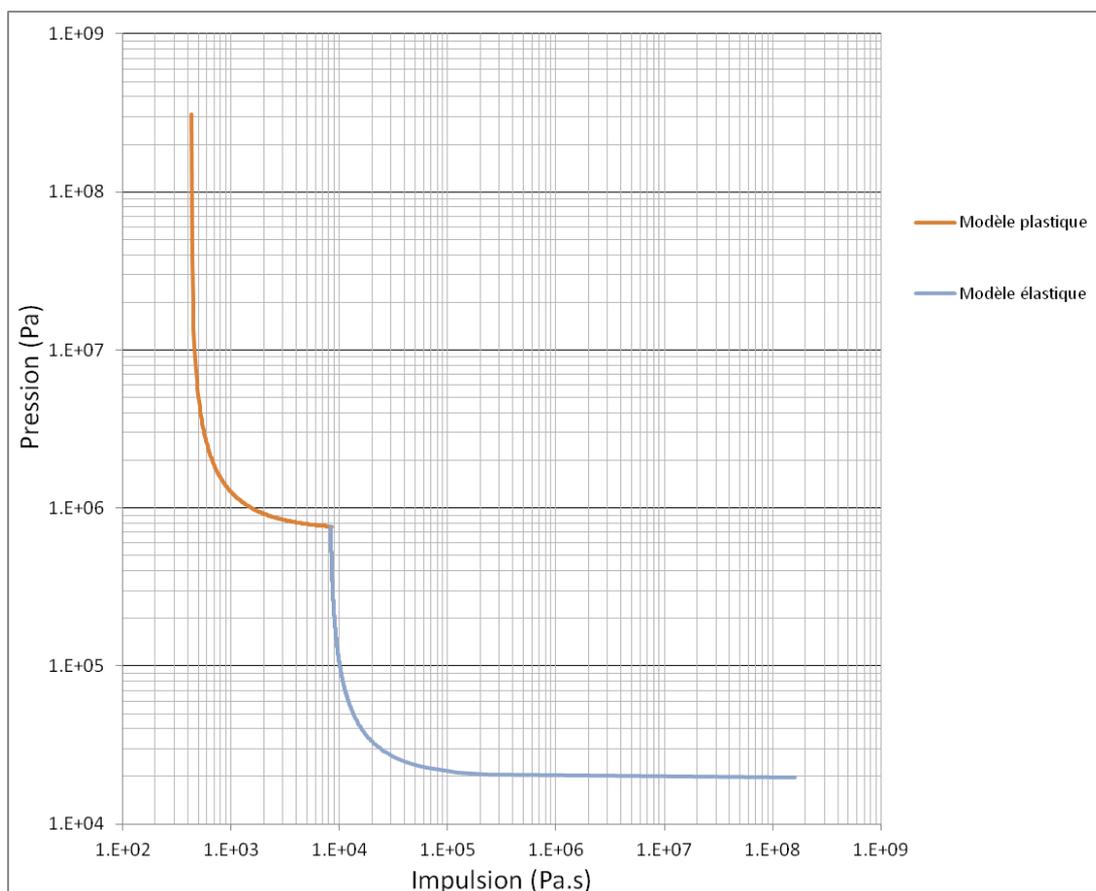
| | | |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Longueur | 40 pieds (12,19 m) | |
| Diamètre (m) | 2,438 m | |
| Capacité (m ³) | 24 m ³ | |
| Epaisseur (mm) | 5 mm | |
| Masse (t) | A vide / A plein | 3,65 / 36 |
| Matière | Acier DIN 17441 Type 1.4401 (C<0,03%) | |

Tableau 10 : Caractéristiques conteneur citerne maritime

3.2.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour les 3 modes de défaillance présentés dans la partie 2.3.4. Les résultats affichés ci-dessous portent uniquement sur le comportement du conteneur citerne en considérant la rupture de la coque comme mode de défaillance.

La plastification des parois s'opère au-dessus de la pression de service des enceintes.



Exemple : Vis-à-vis d'une onde de choc, on commencera à observer la déformation plastique des parois du conteneur citerne pour des pressions appliquées de l'ordre de 200 mbar associées à des temps d'application de 1 sec.

3.2.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

3.2.3.1 RUPTURE OU PLASTIFICATION DE L'ENVELOPPE

Les abaques ci-dessus ont permis de définir l'ensemble des signaux pour lesquels il y a rupture de l'enveloppe du conteneur citerne maritime.

Les distances aux effets dominos en champ libre vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Rupture de l'enveloppe) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Conteneur citerne maritime vide / plein | 25 | 30 | 10 | 15 | 5 | 5 | 25 | 45 | 65 | 10 |

Tableau 11 : Plastification de l'enveloppe – Conteneur citerne maritime

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.2.3.2 TOUS MODES DE DEFAILLANCE CONFONDUS

Les distances aux effets dominos en champ libre ont également été estimées en considérant uniquement le renversement puis le glissement à 5 m comme modes de défaillance.

Le tableau ci-dessous indique les distances aux effets dominos calculées en considérant l'ensemble de ces modes de défaillance. Autrement dit, les distances aux effets dominos associées à chaque mode de défaillance ont été comparées, et la valeur maximale a été ici sélectionnée

| Distances aux effets dominos en m (Tous modes de défaillance confondus) | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-----------------------------|---|---|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Conteneur citerne maritime plein | 50 | 40 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 105 | 205 | 20 |
| vide | 160 | 140 | 25 | 35 | 10 | 15 | 270 | 725 | 1195 | 35 |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Renversement | Renversement- Glissement | Rupture- renversement- glissement | Rupture- renversement- glissement | Renversement- Glissement | Renversement- Glissement | Renversement- Glissement | Glissement | Glissement | Renversement- Glissement |
| Mode de défaillance majorant (vide) | Renversement | Renversement | Glissement | Glissement | Renversement- Glissement | Glissement | Renversement | Renversement | Renversement | Glissement |

Tableau 12 : Distances aux effets dominos – Conteneur citerne maritime

3.2.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

Le comportement du conteneur citerne maritime type est étudié vis-à-vis des agressions thermiques en évaluant les valeurs nécessaires pour obtenir une élévation de température supérieure à 35°C dans le liquide et une élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise au flux thermique.

La réponse du conteneur-citerne chimique, qu'il contienne des liquides inflammables, toxiques ou corrosifs, aux agressions thermiques est la suivante.

Trois types de sollicitation thermique ont donc été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, le critère basé sur l'augmentation de température du contenu (cf. 6.3.2) est atteint au bout de deux heures environ. Le temps nécessaire à l'atteinte d'une température dangereuse du contenu semble suffisamment important pour permettre aux services de pompiers d'intervenir en vue de limiter, voire annihiler, les effets dominos induits. Bien évidemment, cet aspect est fortement conditionné par le type d'événement à l'origine de la sollicitation thermique.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le conteneur est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 6.3.2.
- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la durée limite d'exposition à la flamme était de 14 secondes. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation est de l'ordre de 900 m.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du conteneur citerne maritime à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues. Les modélisations réalisées ci-dessus indiquent que le conteneur citerne maritime plein peut être disposé à 10 mètres du camion citerne de GPL de 20 tonnes sans risquer d'effets dominos en cas de BLEVE de ce dernier.

3.3 FICHE TECHNIQUE- CAMION CITERNE CONTENANT DES SUBSTANCES CHIMIQUES A PRESSION ATMOSPHERIQUE

3.3.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le camion citerne retenu est de type gros porteur, à deux ou trois essieux (Figure 11 et Figure 12). Ses caractéristiques retenues sont celles du Tableau 13.



Figure 11 : Citerne à deux essieux



Figure 12 : Citerne à trois essieux

| | | |
|----------------------------|--|---------------------|
| Longueur (m) | | 12,6 m |
| Diamètre (m) | | 2,5 m |
| Hauteur (m) | | 4 m |
| Capacité (m ³) | | 54,5 m ³ |
| Epaisseur (mm) | | 9 mm |
| Masse (t) | A vide / A plein | 16,950/ 40 |
| Matière | acier P 460 N G1, acier soudable à grain fin R _{p0.2} 460 MPa / R _m 640 MPa | |

Tableau 13 : Caractéristiques camion citerne

3.3.2 COMPOTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour les 3 modes de défaillance présentés. Les résultats affichés ci-dessous portent uniquement sur le comportement du camion citerne en considérant la rupture de la coque comme mode de défaillance.

La plastification des parois s'opère au-dessus de la pression de service des enceintes.

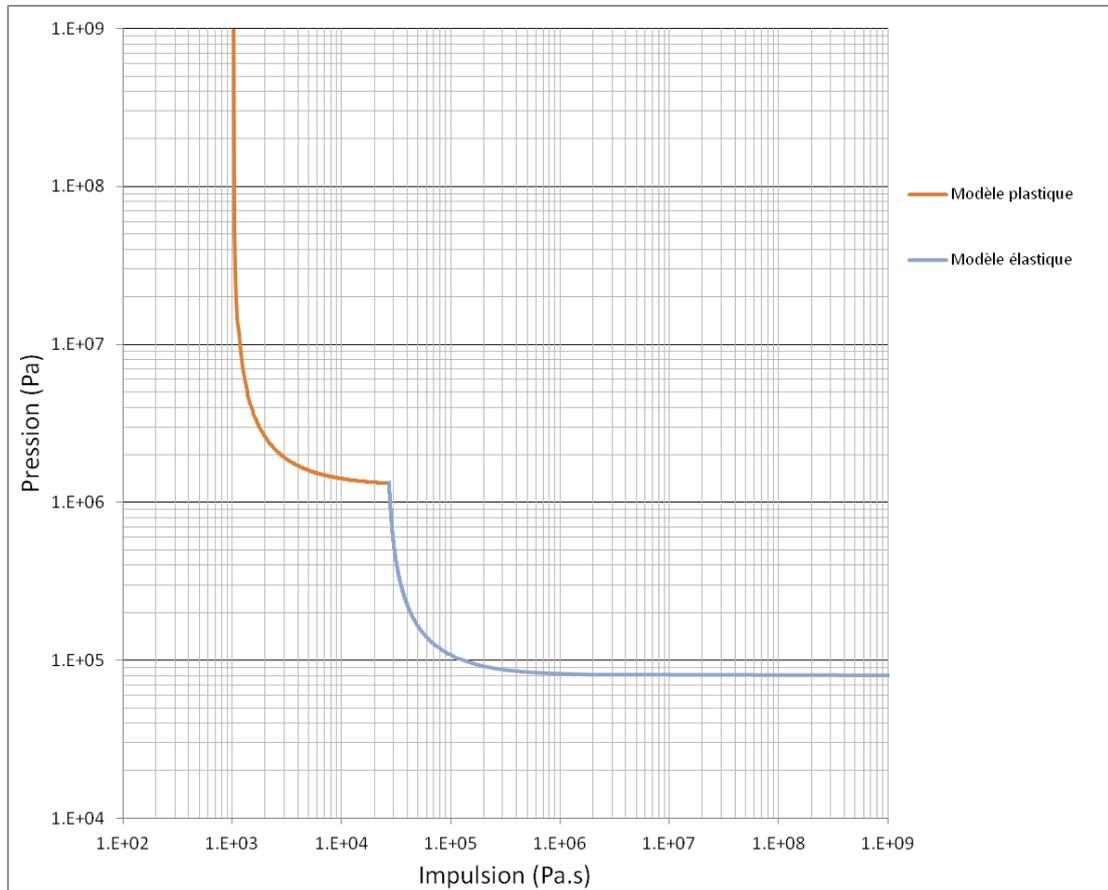


Figure 13 : Pressions de rupture d'un camion citerne

Exemple : Vis-à-vis d'une onde de choc, on commencera à observer la déformation plastique des parois du conteneur citerne pour des pressions appliquées de l'ordre de 800 mbar associées à un temps d'application de 500 ms.

3.3.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

3.3.3.1 RUPTURE OU PLASTIFICATION DE L'ENVELOPPE

Les abaques ci-dessus ont permis de définir l'ensemble des signaux pour lesquels il y a rupture de l'enveloppe du conteneur maritime.

Les distances aux effets dominos en champ libre vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Rupture de l'enveloppe) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Camion citerne vide / plein | 30 | 30 | 10 | 10 | 5 | 5 | 25 | 45 | 65 | 10 |

Tableau 14 : Plastification de l'enveloppe – Camion citerne

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.3.3.2 TOUS MODES DE DEFAILLANCE CONFONDUS

Les distances aux effets dominos en champ libre ont également été estimées en considérant uniquement le renversement puis le glissement à 5 m comme modes de défaillance.

Le tableau ci-dessous indique les distances aux effets dominos calculées en considérant l'ensemble de ces modes de défaillance. Autrement dit, les distances aux effets dominos associées à chaque mode de défaillance ont été comparées, et la valeur maximale a été ici sélectionnée :

| Distances aux effets dominos en m (Tous modes de défaillance confondus) | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Camion citerne plein | 55 | 45 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 110 | 225 | 20 |
| vide | 150 | 120 | 25 | 35 | 10 | 15 | 230 | 510 | 830 | 35 |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Renversement | Renversement | Rupture- renversement- glissement | Renversement- Glissement | Renversement- Glissement | Renversement- Glissement | Renversement- Glissement | Renversement | Renversement | Renversement- Glissement |
| Mode de défaillance majorant (vide) | Glissement | Glissement | Glissement | Glissement | Renversement- Glissement | Glissement | Glissement | Glissement | Glissement | Glissement |

Tableau 15 : Distances aux effets dominos – Camion citerne

3.3.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

La réponse du camion citerne chimique, qu'il contienne des liquides inflammables, toxiques ou corrosifs, aux agressions thermiques est la suivante.

Le comportement du camion-citerne chimique type est étudié vis-à-vis des agressions thermiques en évaluant les valeurs nécessaires pour obtenir une élévation de température supérieure à 35°C dans le liquide et une élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise au flux thermique.

Trois types de sollicitation thermique ont donc été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, le critère fondé sur l'augmentation de température du contenu (cf. 2.3.4) est atteint pour une durée comprise entre 2,9 et 3,9 heures.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le camion-citerne est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 2.3.4.
- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la durée limite d'exposition à la flamme était de 21 secondes. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation serait de l'ordre de 1400 m.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du camion citerne à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues.

Les modélisations réalisées ci-dessus indiquent que le camion citerne plein peut être disposé à 10 mètres du camion citerne de GPL de 20 tonnes sans risquer d'effets dominos en cas de BLEVE de ce dernier.

3.4 FICHE TECHNIQUE - WAGON CITERNE GPL

3.4.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le wagon citerne chimique retenu est du type de celui de la Figure 14. Ses caractéristiques retenues sont celles du Tableau 16.



Figure 14 : Wagon citerne de gaz liquéfié

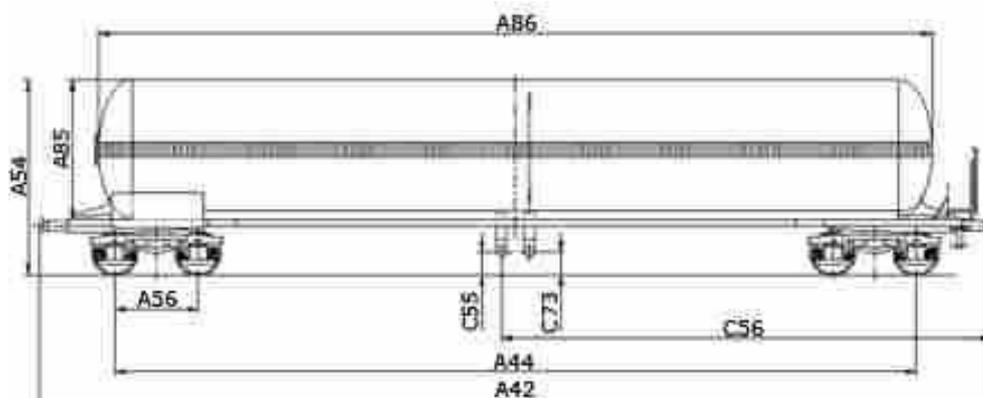


Figure 15 : Wagon citerne gaz liquéfié

| | | |
|------------------------------|--------------------------|-----------|
| Longueur (m) | 17,540 m (A86) | |
| Diamètre (m) | 3,040 m (A85) | |
| Hauteur (m) | 4,265 m (A54) | |
| Capacité (m ³) | 120,308 m ³ | |
| Epaisseur (mm) virole / fond | 13,3 / 15,4 | |
| Masse (t) | A vide / A plein | 35,9 / 90 |
| Matière | P440 NJ4 NFA 36 215 (97) | |

Tableau 16 : Caractéristiques d'un wagon citerne de gaz liquéfié

3.4.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour 2 modes de défaillance (Renversement de l'engin et rupture de l'enveloppe). Les résultats affichés ci-dessous portent uniquement sur le comportement du wagon citerne GPL en considérant la rupture de la coque comme mode de défaillance.

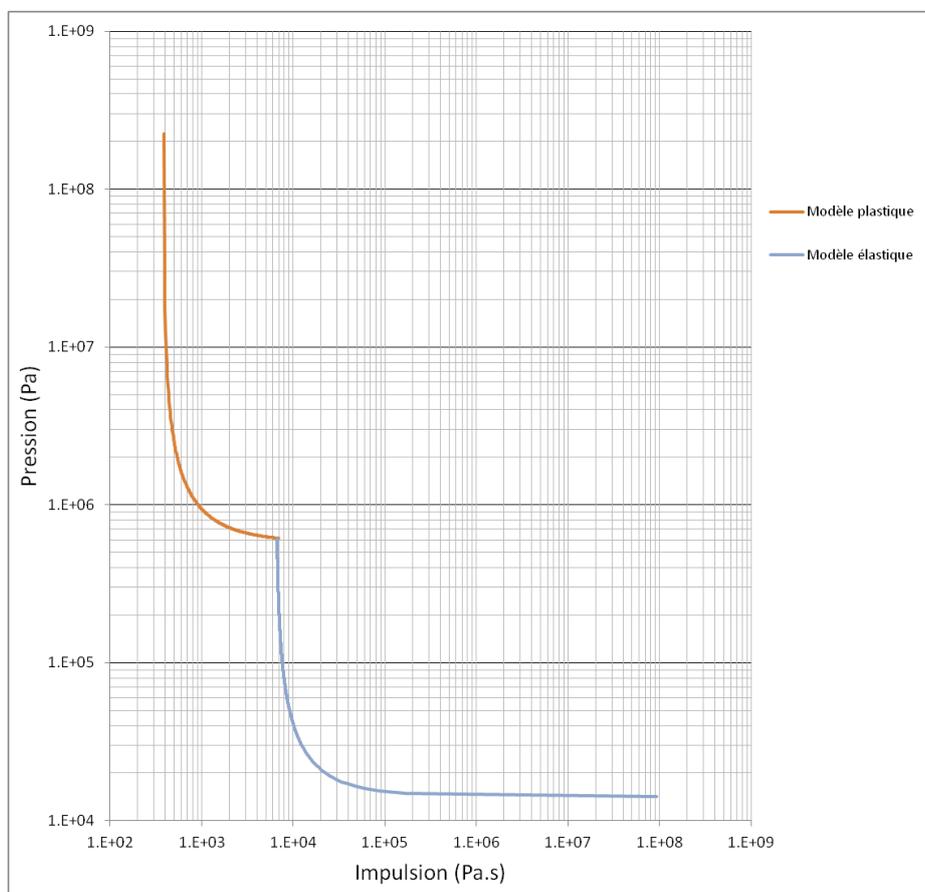


Figure 16 : Pressions de rupture – Wagon citerne GPL

Exemple : Vis-à-vis d'une onde de choc, on commencera à observer le flambement des parois du conteneur citerne pour des pressions appliquées de l'ordre de 150 mbar associées à un temps d'application de 1 seconde.

3.4.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

3.4.3.1 RUPTURE OU PLASTIFICATION DE L'ENVELOPPE

Les abaques ci-dessus ont permis de définir l'ensemble des signaux pour lesquels il y a rupture de l'enveloppe du wagon-citerne.

Les distances aux effets dominos vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Rupture de l'enveloppe) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T - 5mm | VCE GPL 20T ou 57T - 20mm | VCE GPL 20T ou 57T - 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Wagon citerne GPL plein / vide | 40 | 35 | 10 | 15 | 10 | 10 | 25 | 45 | 310 | 15 |

Tableau 17 : Plastification de l'enveloppe – Wagon citerne GPL

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.4.3.2 TOUS MODES DE DEFAILLANCE CONFONDUS

Les distances aux effets dominos en champ libre ont également été estimées en considérant uniquement le renversement puis le glissement à 5 m comme modes de défaillance.

Le tableau ci-dessous indique les distances aux effets dominos calculées en considérant l'ensemble de ces modes de défaillance. Autrement dit, les distances aux effets dominos associées à chaque mode de défaillance ont été comparées, et la valeur maximale a été ici sélectionnée :

| Distances aux effets dominos en m (Tous modes de défaillance confondus) | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|--------------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Wagon citerne GPL plein | 50 | 40 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 95 | 310 | 20 |
| vide | 60 | 50 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 160 | 310 | 20 |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Rupture- Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Rupture | Renversement |
| Mode de défaillance majorant (vide) | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Rupture- Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Renversement |

Tableau 18 : Distances aux effets dominos – Wagon citerne GPL

3.4.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

Le comportement du wagon-citerne GPL type est étudié vis-à-vis des agressions thermiques en évaluant les valeurs nécessaires pour obtenir une élévation de température supérieure à 35°C dans le liquide et une élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise au flux thermique.

La réponse du wagon citerne de gaz liquéfié, qu'il soit de GPL ou chimique, aux agressions thermiques est synthétisée sur le tableau ci-dessous.

Nous pouvons noter que le temps d'exposition pour obtenir une élévation de température tant du liquide que de l'enveloppe aux seuils précités dépend de la matière dangereuse.

| Contenu | Phénomène | Seuil étudié | Effets |
|--------------------|------------------------------------|--------------|---|
| Chlore | Flux continu | SELS | Au bout de 3 heures |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Sans effet |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 1400 mètres |
| NH3 liquide | Flux continu | SELS | Au bout de 3,5 heures |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Sans effet |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 1400 mètres |
| Butane | Flux continu | SELS | Au bout de 2,8 heures |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Sans effet |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 1400 mètres |

Tableau 19 : Résultats des durées d'exposition limites aux phénomènes thermiques

Trois types de sollicitation thermique ont été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, le critère fondé sur l'augmentation de température du contenu (cf. 6.3.2) est atteint pour une durée d'application comprise entre 2,8 et 3,5 heures. Le temps nécessaire à l'atteinte d'une température dangereuse du contenu semble suffisamment important pour permettre aux services de pompiers d'intervenir en vue de limiter, voire annihiler, les effets dominos induits. Bien évidemment, cet aspect est fortement conditionné par le type d'événement à l'origine de la sollicitation thermique.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le conteneur est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par un BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 6.3.2.

- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la durée limite d'exposition à la flamme était de 21 secondes. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation serait de 1400 m.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du wagon citerne à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues. Les modélisations réalisées ci-dessus indiquent que le wagon citerne GPL peut être disposé à 10 mètres du camion porteur 47 m³ sans risquer d'effets dominos en cas de BLEVE de ce dernier.

3.5 FICHE TECHNIQUE - WAGON CITERNE CHIMIQUE

3.5.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le wagon citerne chimique retenu est du type de celui de la Figure 18. Ses caractéristiques retenues sont celles du Tableau 20.



Figure 17 : Wagon citerne chimique

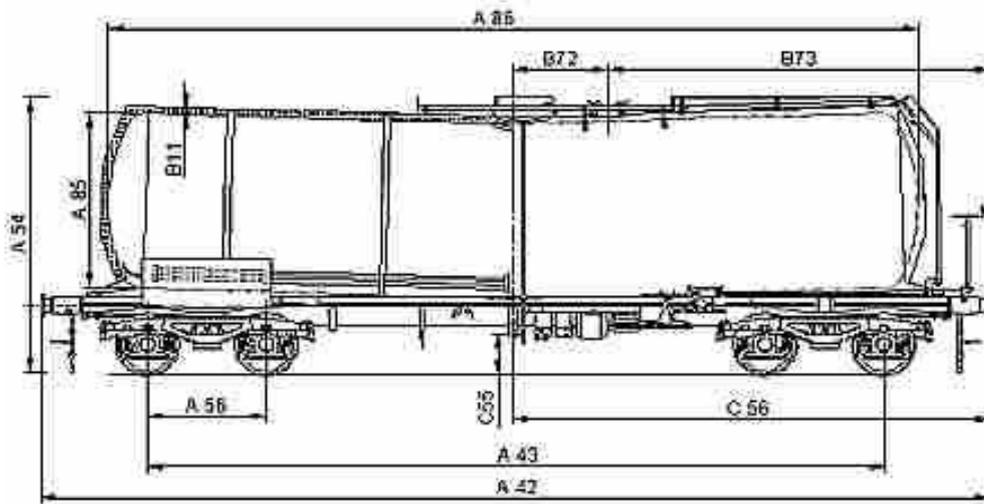


Figure 18 : Wagon chimique légendes du Tableau 20

| | | |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Longueur (m) | 12,8 m (A86) | |
| Diamètre (m) | 2,7 m (A85) | |
| Hauteur (m) | 4,295 m (A54) | |
| Capacité (m ³) | 70,567 m | |
| Epaisseur (mm) | 6,2 mm | |
| Masse (t) | A vide / A plein | 24,3 / 90 |
| Matière | X 2 Cr Ni 19-11 suivant NF EN 10088-2 | |

Tableau 20 : Caractéristiques wagon citerne chimique

3.5.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour 2 modes de défaillance (Renversement de l'engin et rupture de l'enveloppe). Les résultats affichés ci-dessous portent uniquement sur le comportement du wagon citerne chimique en considérant la rupture de la coque comme mode de défaillance.

La plastification des parois s'opère au-dessus de la pression de service des enceintes.

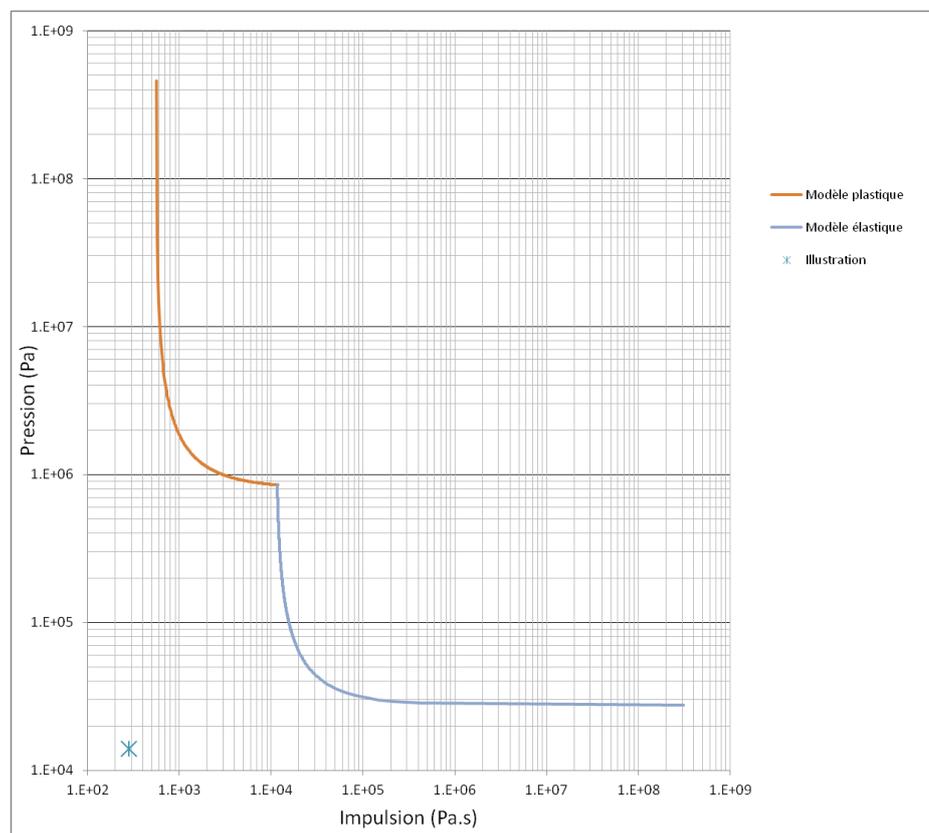


Figure 19 : Pressions de rupture – Wagon citerne chimique

Illustration : Un wagon-citerne chimique soumis à une onde de choc de 140 mbar (14 000 Pa) pendant 100 ms ne verra pas son enveloppe rompre.

Vis-à-vis d'une onde de choc, on commencera à observer le flambement des parois du conteneur citerne pour des pressions appliquées de l'ordre de 120 mbar associées à un temps d'application de 1,5 seconde.

3.5.1 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

3.5.1.1 RUPTURE OU PLASTIFICATION DE L'ENVELOPPE

Les abaques ci-dessus ont permis de définir l'ensemble des signaux pour lesquels il y a rupture de l'enveloppe du wagon-citerne chimique.

Les distances aux effets dominos en champ libre vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Rupture de l'enveloppe) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Wagon citerne chimique vide / plein | 35 | 30 | 10 | 15 | 10 | 10 | 25 | 45 | 65 | 15 |

Tableau 21 : Plastification de l'enveloppe – Wagon citerne chimique

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.5.1.2 TOUS MODES DE DEFAILLANCE CONFONDUS

Les distances aux effets dominos en champ libre ont également été estimées en considérant uniquement le renversement puis le glissement à 5 m comme modes de défaillance.

Le tableau ci-dessous indique les distances aux effets dominos calculées en considérant l'ensemble de ces modes de défaillance. Autrement dit, les distances aux effets dominos associées à chaque mode de défaillance ont été comparées, et la valeur maximale a été ici sélectionnée :

| Distances aux effets dominos en m (Tous modes de défaillance confondus) | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Wagon citerne chimique plein | 50 | 35 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 100 | 135 | 20 |
| vide | 70 | 60 | 10 | 15 | 10 | 10 | 73 | 236 | 410 | 20 |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Rupture- Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement |
| Mode de défaillance majorant (vide) | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Rupture- Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement | Renversement |

Tableau 22 : Distances aux effets dominos – Wagon citerne chimique

3.5.2 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

Le comportement du wagon-citerne chimique type est étudié vis-à-vis des agressions thermiques en évaluant les valeurs nécessaires pour obtenir une élévation de température supérieure à 35°C dans le liquide et une élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise au flux thermique.

La réponse du wagon citerne chimique, qu'il contienne des liquides inflammables, toxiques ou corrosifs, aux agressions thermiques est la suivante.

Trois types de sollicitation thermique ont été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, le critère fondé sur l'augmentation de température du contenu (cf. 2.3.4) est atteint pour une durée d'application comprise entre 2,8 et 3,5 heures. Le temps nécessaire à l'atteinte d'une température dangereuse du contenu semble suffisamment important pour permettre aux services de pompiers d'intervenir en vue de limiter, voire annihiler, les effets dominos induits. Bien évidemment, cet aspect est fortement conditionné par le type d'événement à l'origine de la sollicitation thermique.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le wagon-citerne chimique est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par un BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 2.3.4.
- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la durée limite d'exposition à la flamme était de 21 secondes. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation serait de l'ordre de 1400 m.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du wagon citerne chimique à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues. Les modélisations réalisées ci-dessus indiquent que le wagon citerne chimique peut être disposé à 10 mètres du camion porteur 47 m³ sans risquer d'effets dominos en cas de BLEVE de ce dernier.

3.6 FICHE TECHNIQUE - CAMION BACHE TYPE TAUTLINER

3.6.1 DESCRIPTIF DETAILLE

Le camion bâché retenu est du type de celui de la Figure 20. Ses caractéristiques sont réunies dans le Tableau 23.



Figure 20 : Camion bâché de type Tautliner

| | | |
|---|--|------|
| Longueur (m) | 13,7 m | |
| Largeur (m) | 2,5 m | |
| Hauteur chargement (m) | 2,8 m | |
| Hauteur totale (m) | 4 m | |
| Capacité (m ³) | 105 m ³ | |
| Epaisseur bâche (toit et parois) / épaisseur plancher bois (mm) | 3/35 | |
| Masse (t) | A vide / A plein | 8/33 |
| Matière | Toile en polyester enduite de PVC 900gr/m ² | |

Tableau 23 : Caractéristiques camion bâché de type Tautliner

3.6.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour les 3 modes de défaillance présentés dans la partie 2.3.4. Les résultats de ces calculs indiquent que la rupture de la paroi du camion serait le premier mode de défaillance constaté pour des niveaux de surpression inférieur à 1 mbar. En effet, la résistance à la déchirure et à la traction des bâches polyester est très faible. Ainsi pour des signaux de surpression dont le pic atteint des valeurs minimales (<1 mbar), la rupture de la bâche PVC sera constatée.

Néanmoins, il conviendra de tenir compte des caractéristiques intrinsèques du contenu de la remorque et de son mode de conditionnement pour juger de la vulnérabilité du camion. Ainsi, ce seuil critique de quelques mbar peut être retenu comme seuil de vulnérabilité pour des produits très sensibles à l'augmentation de pression (ex : ammonitrates) ou à la friction tels que certains explosifs. Au contraire, pour les produits dangereux peu affectés par ces conditions extrêmes, on pourra éventuellement statuer que le mode de vulnérabilité considéré sera le renversement du camion.

3.6.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

Compte tenu de la faible résistance de la bâche à la surpression, il serait complexe de définir des distances aux effets dominos en considérant la rupture de l'enveloppe comme mode de rupture principal pour le camion bâché.

Ainsi, l'INERIS a choisi d'indiquer les distances aux effets dominos à respecter afin de prévenir le risque de renversement du camion. Néanmoins, il est certain que la rupture de la bâche interviendra pour ces distances. Par conséquent, le tableau ci-dessous présente un intérêt si le comportement du contenu du camion à la surpression est connu.

Par exemple, la mise en place de ces distances aux effets dominos pour un camion bâché contenant des fûts d'ammoniac permettrait de s'assurer que l'engin ne se renversera pas. Il reste à caractériser la réponse des fûts à l'onde de surpression incidente.

De même, ces camions bâchés sont couramment utilisés pour transporter des engrais en vrac. Il serait donc nécessaire de caractériser le risque d'effets dominos inhérent à la mise en surpression de ces produits.

Les distances aux effets dominos vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées en considérant le renversement du camion comme unique mode de défaillance. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Renversement) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Camion bâché plein | 55 | 45 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 110 | 225 | 20 |
| Camion bâché vide | 80 | 70 | 10 | 15 | 10 | 10 | 110 | 295 | 510 | 20 |

Tableau 24 : Renversement – Camion bâché

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.6.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

La réponse du camion bâché type Tautliner aux agressions thermiques est synthétisée dans le tableau suivant :

| Contenu | Phénomène | Seuil étudié | Effets |
|---------|------------------------------------|--------------|--|
| Vide | Flux continu | SELS | Au bout d'une trentaine de secondes |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Température de dégradation de la bâche atteinte Température de dégradation de la bâche PVC atteinte |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 30 mètres |

Tableau 25 :
Résultats des durées d'exposition limites aux phénomènes thermiques

Trois types de sollicitation thermique ont été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, la température de dégradation de la bâche est atteinte pour une durée d'application de l'ordre d'une trentaine de secondes.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le camion est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par un BLEVE de ce niveau d'intensité engendrent la dégradation de la bâche PVC.

Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la bâche en PVC atteignait sa température de dégradation au bout d'un temps d'exposition au feu de nuage de 0,5 seconde. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation serait de l'ordre d'une trentaine de mètres.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du camion bâché à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues.

| | | |
|---------------------------------------|--|-----------|
| Longueur (m) | 18,7 m | |
| Largeur (m) | 2,7 m | |
| Hauteur chargement (m) | 2,9 m | |
| Hauteur totale (m) | 4,2 m | |
| Capacité (m ³) | 102 m ³ | |
| Epaisseur (mm) bâche / socle en chêne | 3 / 45 mm | |
| Masse (t) | A vide / A plein | 26 / 54 t |
| Matière | Toile en polyester enduite de PVC 900gr/m ² | |

Tableau 26 : Caractéristiques d'un wagon à bâchage mécanique

3.7.2 COMPORTEMENT A LA SURPRESSION

L'INERIS a donc mené des modélisations pour les 3 modes de défaillance présentés dans la partie 6.3.2. Les résultats de ces calculs indiquent que la rupture de la bâche du wagon serait le premier mode de défaillance constaté pour des niveaux de surpression inférieur à 1 mbar. En effet, la résistance à la déchirure et à la traction de ces bâches est très faible. Ainsi pour des signaux de surpression dont le pic atteint des valeurs minimales (<1 mbar), la rupture de la bâche sera constatée.

Néanmoins, il conviendra de tenir compte des caractéristiques intrinsèques du contenu du wagon et de son mode de conditionnement pour juger de la vulnérabilité de l'engin. Ainsi, ce seuil critique de quelques mbar peut être retenu comme seuil de vulnérabilité pour des produits très sensibles à l'augmentation de pression (ex : ammonitrates) ou à la friction tels que certains explosifs. Au contraire, pour les produits dangereux peu affectés par ces conditions extrêmes, on pourra éventuellement statuer que le mode de vulnérabilité considéré sera le renversement du wagon.

3.7.3 DISTANCES AUX EFFETS DOMINOS LIES A LA SURPRESSION

Le cas du wagon bâché est à traiter à part. En effet, compte tenu de la faible résistance de la bâche à la surpression, il serait complexe de définir des distances aux effets dominos en considérant la rupture de l'enveloppe comme mode de rupture principal.

Ainsi, l'INERIS a choisi d'indiquer les distances aux effets dominos à respecter afin de prévenir le risque de renversement du wagon. Néanmoins, il est certain que la rupture de la bâche interviendra pour ces distances. Par conséquent, le tableau ci-dessous présente un intérêt si le comportement du contenu du wagon à la surpression est connu.

Par exemple, la mise en place de ces distances aux effets dominos pour un wagon bâché contenant des fûts d'ammoniac permettrait de s'assurer que l'engin ne se renversera pas. Il reste à caractériser la réponse des fûts à l'onde de surpression incidente.

De même, ces wagons bâchés sont couramment utilisés pour transporter des engrais en vrac. Il serait donc nécessaire de caractériser le risque d'effets dominos inhérent à la mise en surpression de ces produits.

Les distances aux effets dominos vis-à-vis des événements types ont ainsi pu être calculées en considérant le renversement du wagon comme unique mode de défaillance. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Distances aux effets dominos en m (Renversement) | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | VCE GPL 20T – 5mm | VCE GPL 20T ou 57T – 20mm | VCE GPL 20T ou 57T – 80mm | VCE GPL 20T Rupture | VCE GPL 57T Rupture | Nitrate |
| Wagon bâché plein | 55 | 50 | 10 | 15 | 10 | 10 | 55 | 200 | 380 | 20 |
| Wagon bâché vide | 90 | 80 | 10 | 15 | 10 | 10 | 150 | 425 | 765 | 20 |

Tableau 27 : Distances aux effets dominos – Wagon bâché

Les distances ont été arrondies à « plus 5 m » pour des distances comprises entre 0 et 1000 m.

3.7.4 COMPORTEMENT AUX AGRESSIONS THERMIQUES

La réponse du wagon bâché aux agressions thermiques est synthétisée dans le tableau suivant :

| Contenu | Phénomène | Seuil étudié | Effets |
|---------|------------------------------------|--------------|--|
| Vide | Flux continu | SELS | Au bout d'une trentaine de secondes |
| | BLEVE de porteur 47 m ³ | SELS | Température de dégradation de la bâche atteinte Température de dégradation de la bâche PVC atteinte |
| | Feu éclair | SEL / SELS | A partir d'une distance à la LII de 30 mètres |

Tableau 28 : Résultats des durées d'exposition limites aux phénomènes thermiques

Trois types de sollicitation thermique ont été étudiés pour un niveau d'intensité correspondant au SELS :

- Un flux continu de valeur 8 kW/m² : les modélisations réalisées indiquent que pour un tel flux, la température de dégradation de la bâche est atteinte pour une durée d'application de l'ordre d'une trentaine de secondes.
- Un BLEVE dont la dose thermique impactant le wagon bâché est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés montrent que les effets thermiques induits par un BLEVE de ce niveau d'intensité engendrent la dégradation de la bâche PVC.
- Un feu de nuage : les modélisations réalisées ont montré que la bâche en PVC atteignait sa température de dégradation au bout d'un temps d'exposition au feu de nuage de 0,5 seconde. Compte tenu de la vitesse du front de flamme considérée, cette durée correspondrait à un nuage dont la plus grande dimension depuis la source d'inflammation serait de l'ordre d'une trentaine de mètres.

Il serait à présent nécessaire de déterminer les distances aux effets dominos à mettre en place afin de prévenir d'éventuels effets dominos provoqués par des sollicitations thermiques. Cela passe tout d'abord par la détermination de la réponse du wagon bâché à une gamme de signaux thermiques caractéristiques des BLEVEs, des feux éclairs et des sollicitations thermiques continues.

4. EXEMPLE D'APPLICATION

Un wagon citerne chimique est situé à 85 m d'un camion-citerne rempli de 20 T de GPL, l'événement redouté est le BLEVE du camion citerne (remplissage 10%).

On souhaite étudier le comportement aux effets de surpression du wagon citerne chimique face au BLEVE (effets de surpression et effets thermiques) du camion citerne de 20T de GPL.

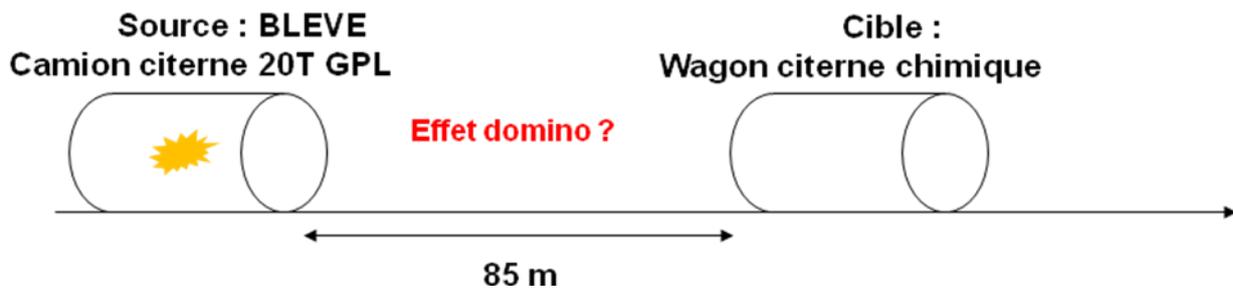


Figure 23 : Exemple d'application

4.1 ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'ENVELOPPE D'UN ENGIN DE TRANSPORT AUX EFFETS DE SURPRESSION

4.1.1 APPROCHE DIRECTE

L'engin de transport cible est ici le wagon citerne chimique. La fiche du wagon citerne chimique, du paragraphe 3.5, fournit :

- Un descriptif détaillé de l'engin ;
- Son comportement à la surpression ;
- Les distances aux effets dominos liés à la surpression
- Les agressions thermiques

Le scénario source correspond à un BLEVE d'un camion citerne de 20T de GPL, ce scénario étant un événement type, la distance aux effets dominos entre ce phénomène et l'engin cible est donnée au paragraphe 3.5.1 dans le Tableau 22 reporté ci-dessous.

| | Explosifs 1.1D | Explosifs 1.3G | BLEVE GPL 20T | BLEVE GPL 57T | ... |
|---|----------------|----------------|----------------------------------|--------------------------|-----|
| Wagon citerne chimique plein | 50 | 35 | 10 | 15 | ... |
| Mode de défaillance majorant (plein) | Renversement | Renversement | Rupture- Renversement | Rupture- Renversement | ... |

Ainsi, la distance minimale à mettre en place entre le BLEVE d'un camion citerne de 20T de GPL et un wagon citerne chimique afin de ne pas avoir effet domino est de 10 m.

A une distance de 85 m, il n'est donc pas possible d'obtenir un effet domino lié à la surpression.

4.1.2 APPROCHE SPECIFIQUE

Dans le cas où le scénario source n'était pas un événement type traité dans le guide, il est possible de déterminer le comportement de l'enveloppe du wagon citerne chimique en utilisant les diagrammes des sous-chapitres « Comportement à la surpression » des fiches engins.

1^{ère} étape Détermination du pic de pression max de l'onde de choc

Les distances d'effets de surpression associées à cet événement, aux seuils réglementés SELS, SEL et SEI, qui figurent dans une étude de danger, sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Wagon citerne chimique situé à 85 m
=> Dans la zone 50-140 mbar

| Type de contenant | 200 mbar | 140 mbar | 50 mbar |
|---------------------------------|----------|----------|---------|
| Camion citerne 45m ³ | 45 m | 65 m | 130 m |

Tableau 29 : Distances aux effets de surpression (en mètres) associées au BLEVE du camion citerne (remplissage à 10%)

Le wagon-citerne chimique est soumis à une pression comprise entre 50 et 140 mbar. On retiendra donc dans une approche sécuritaire une pression de 140 mbar.

2^{ème} étape Détermination du temps d'application de l'onde de choc

Connaissant la distance entre le terme source et la cible, ainsi que le volume du produit transporté, on peut déduire du présent rapport le temps d'application.

Le BLEVE en provenance d'un conteneur citerne rempli à 10% à un temps d'application entre 20 et 40 ms. De manière sécuritaire, on retiendra donc un temps d'application de 40 ms.

Le wagon-citerne chimique est donc soumis à une onde choc d'une pression de 140 mbar pendant 40 ms.

Le schéma suivant illustre la seconde étape.

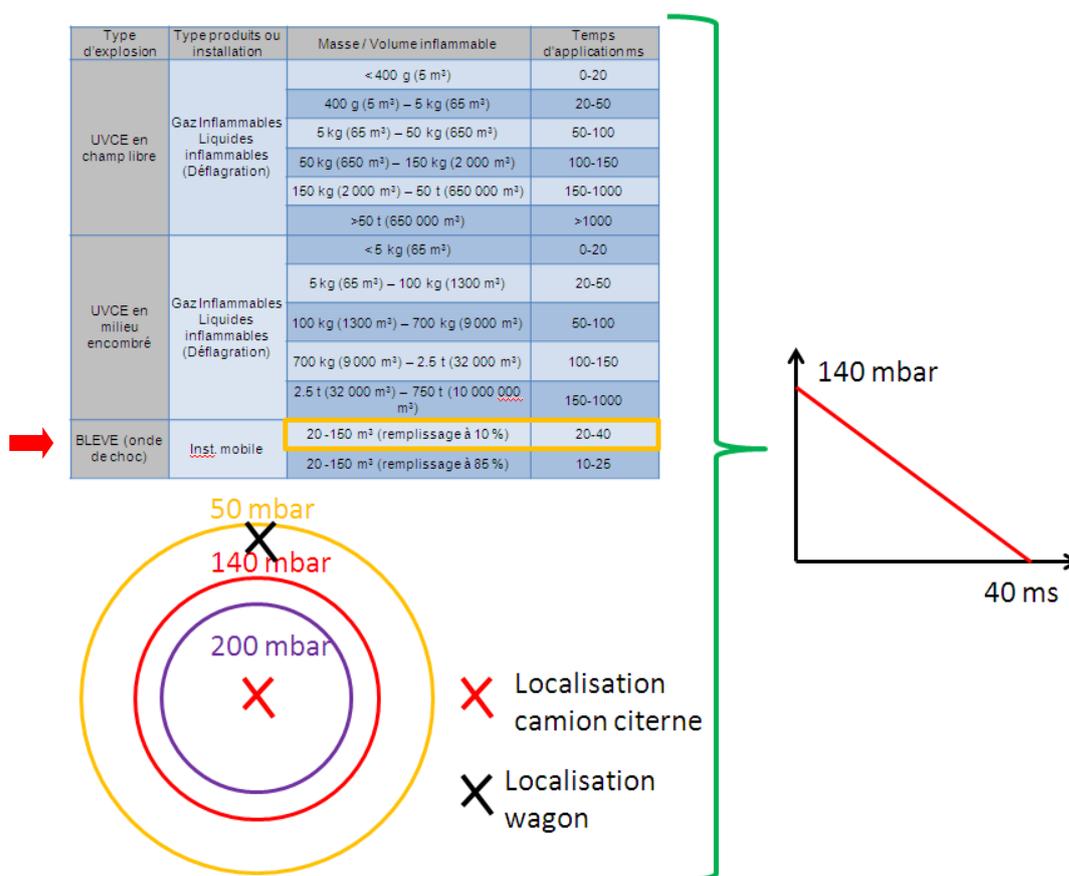


Figure 24 : schéma explicatif de la méthodologie à mettre en œuvre pour calculer un signal de surpression forfitaire appliqué sur une cible

3^{ème} étape : Détermination du comportement de l'enveloppe du wagon-citerne

Avec ce signal, nous pouvons ensuite déterminer le comportement de l'enveloppe du wagon-citerne chimique en se basant sur les critères de vulnérabilité du paragraphe 2.3.4.

Le comportement du wagon-citerne chimique peut être déterminé en consultant la fiche spécifique au paragraphe 3.5. Dans cette fiche spécifique, il est possible de déterminer le comportement de l'enveloppe du wagon-citerne chimique de deux manières distinctes.

- Soit à partir du tableau où figurent les distances maximum où doit se situer le wagon citerne chimique pour que son enveloppe ne rompe pas lorsqu'elle est soumise aux effets dominos issus des événements types de l'arrêt du 18/12/2009. Cette approche a été appliquée dans le paragraphe précédent.
- Soit à partir de l'abaque en Figure 19 de la fiche spécifique au § 3.5.2, en reportant le signal de surpression en ordonnée et l'impulsion en abscisse. Dans notre exemple le signal de surpression en ordonnée est de 140 mbar soit 14 000 Pa et l'impulsion en abscisse est égale à :

$$\frac{14000Pa * 40 * 10^{-3}s}{2} = 280 Pa.s$$

Ce qui correspond à l'aire sous la courbe du signal de pression (de temps d'application de 40 ms).

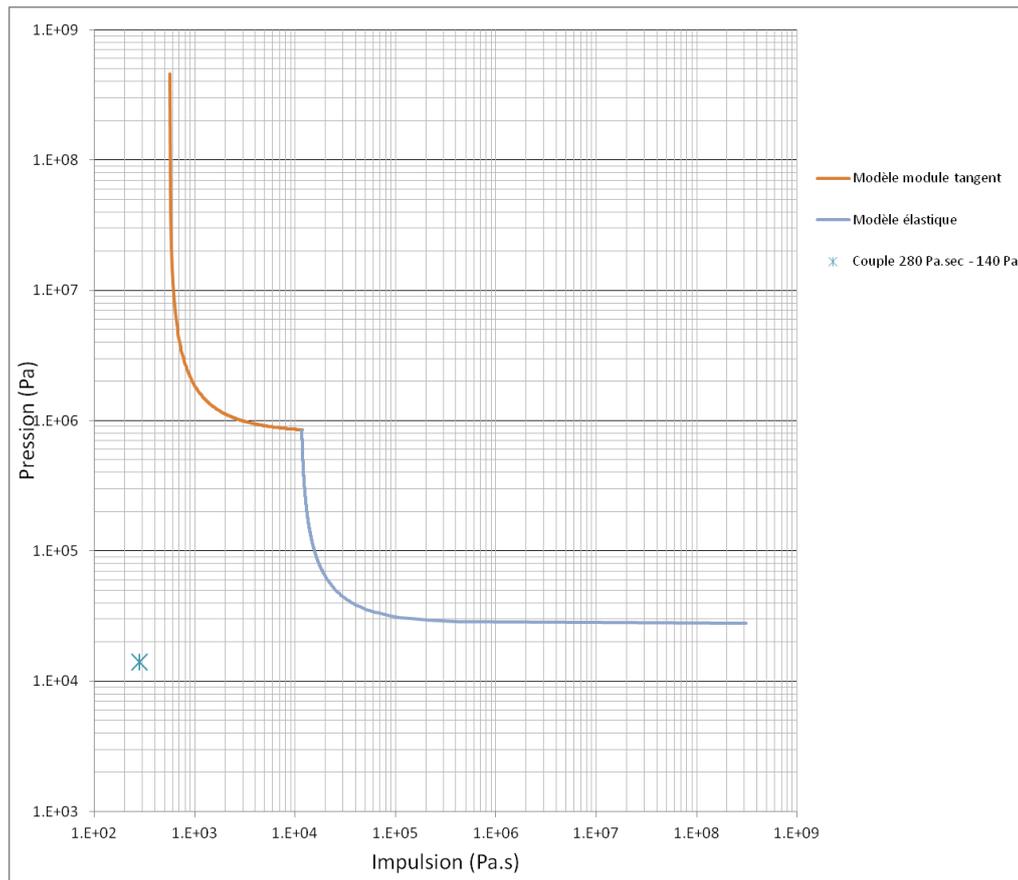


Figure 25 : Pressions de rupture – Wagon citerne chimique

Nous pouvons constater dans notre exemple que l'enveloppe du wagon-citerne chimique ne rompt pas (X sur la figure ci-dessus).

4.2 ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'ENVELOPPE D'UN ENGIN DE TRANSPORT AUX EFFETS THERMIQUES

Les distances d'effets thermiques associées à cet événement, aux seuils réglementés SELS, SEL et SEI, qui figurent dans une étude de danger, sont indiquées dans le Tableau 30.

Ce rassemble les distances aux effets thermiques figurant dans la circulaire DPPR/SEI2/AL-07-0257 du 23/07/07 relative à l'évaluation des risques et des distances d'effets autour des dépôts de liquides inflammables et des dépôts de gaz inflammables liquéfiés.

Ces distances d'effets, valables pour le propane et le butane, sont calculées en considérant une pression d'éclatement de 25 bars pour le camion citerne.

Le wagon-citerne chimique est situé dans la zone d'effets thermiques SELS.

Le comportement du wagon-citerne chimique type est étudié vis-à-vis des agressions thermiques en évaluant les valeurs nécessaires pour obtenir une élévation de température supérieure à 35°C dans le liquide et une élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise au flux thermique.

| | SELS | SEL | SEI |
|--------------------------|--|--|---|
| Type de contenant | 1800 (kW/m²)^{4/3}.s | 1000 (kW/m²)^{4/3}.s | 600 (kW/m²)^{4/3}.s |
| Camion-citerne de 20 T | 120 m | 170 m | 210 m |

Tableau 30 : Distances aux effets thermiques (en mètres) de BLEVE de réservoirs mobiles de propane ou de butane

Un BLEVE dont la dose thermique impactant le wagon-citerne chimique est de 1800 (kW/m²)^{4/3}.s : les calculs réalisés au paragraphe 3.5.2 de la fiche spécifique wagon citerne chimique montrent que les effets thermiques induits par un BLEVE de ce niveau d'intensité ne permet pas d'atteindre le critère énoncé au chapitre 2.3.4 (Elévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe et Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne).

5. CONCLUSION

Ce document présente une méthode d'étude des engins de transport vis-à-vis des agressions accidentelles en vue d'en tirer des valeurs seuils.

Les engins considérés sont les suivants :

- conteneur maritime ;
- conteneur-citerne maritime ;
- camion-citerne contenant des substances chimiques à pression atmosphérique ;
- wagon citerne chimique ;
- wagon-citerne de gaz liquéfiés ;
- camion bâché de type Tautliner ;
- wagon bâché.

Les agressions accidentelles considérées sont :

- des explosions (détonations et déflagrations) ;
- des effets thermiques transitoires : phénomènes de type boule de feu et feu éclair ;
- des effets thermiques continus sous forme de rayonnement.

La réponse des engins est analysée sous les aspects suivants :

- pour les explosions en termes de :
 - glissement suivi de renversement ;
 - renversement si blocage ;
 - rupture ;
- pour les phénomènes thermiques en termes de :
 - température de propagation d'incendie ;
 - température de rupture de cuve ;
 - température vis-à-vis de la température admissible par le fluide pour éviter une dilatation excessive.

Des abaques permettent de qualifier la réponse des engins à la surpression en champ libre dans le domaine d'étude.

Des tableaux permettent de déterminer la distance aux effets dominos **en champ libre** à respecter pour que l'enveloppe d'un « contenant type » selon l'arrêté du 18 décembre 2009 ne se rompe pas sous l'effet de surpression d'un autre contenant type.

Les distances obtenues en champ libre qui figurent dans ces tableaux seraient très différentes en présence d'obstacles entre l'agresseur et la cible, selon le rôle de protecteur ou d'amplificateur des effets que les obstacles peuvent jouer.

Des fiches techniques, propres à chaque engin de transport étudié, présentent les résultats du comportement de l'enveloppe des engins de transport aux effets de surpression et aux effets thermiques en champ libre.

6. REFERENCES

CSTB. (2008). *Guide PPRT - Complément technique relatif à l'effet de surpression - Recommandations et précautions en vue de réduire les risques*. Paris: Ministère de l'Écologie et du Développement Durable.

Departments of the Army, the Navy, and the Air Force. (1990, November). TM 5-1300, NAVFAC, P-397, AFR 88-22. *Structures to resist the effects of accidental explosions*. Washington, DC, US.

Efectis France, LNE. (2008). *Plan de Prévention des Risques Technologiques. Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique*. Paris: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire.

EFFECTIS, LNE. (2008). *Plan de prévention des Risques Technologiques, Guide de prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique avec pour unique but la protection des personnes*. Paris: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire.

Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables. (2007, Mai). UVCE dans un dépôt de liquides inflammables - version 01bis.

Groupe de travail sectoriel "GPL". (2006). 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*.

INERIS. (2009). *Cahier technique de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires*. Paris: Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.

INERIS. (1988). rapport d'étude INERIS N° - DRA-08-98444-13289A. *Séquence d'étude technique du plan de prévention des risques technologiques de TotalGaz à Arleux - Investigations complémentaires. Approches de la vulnérabilité et estimations foncières*.

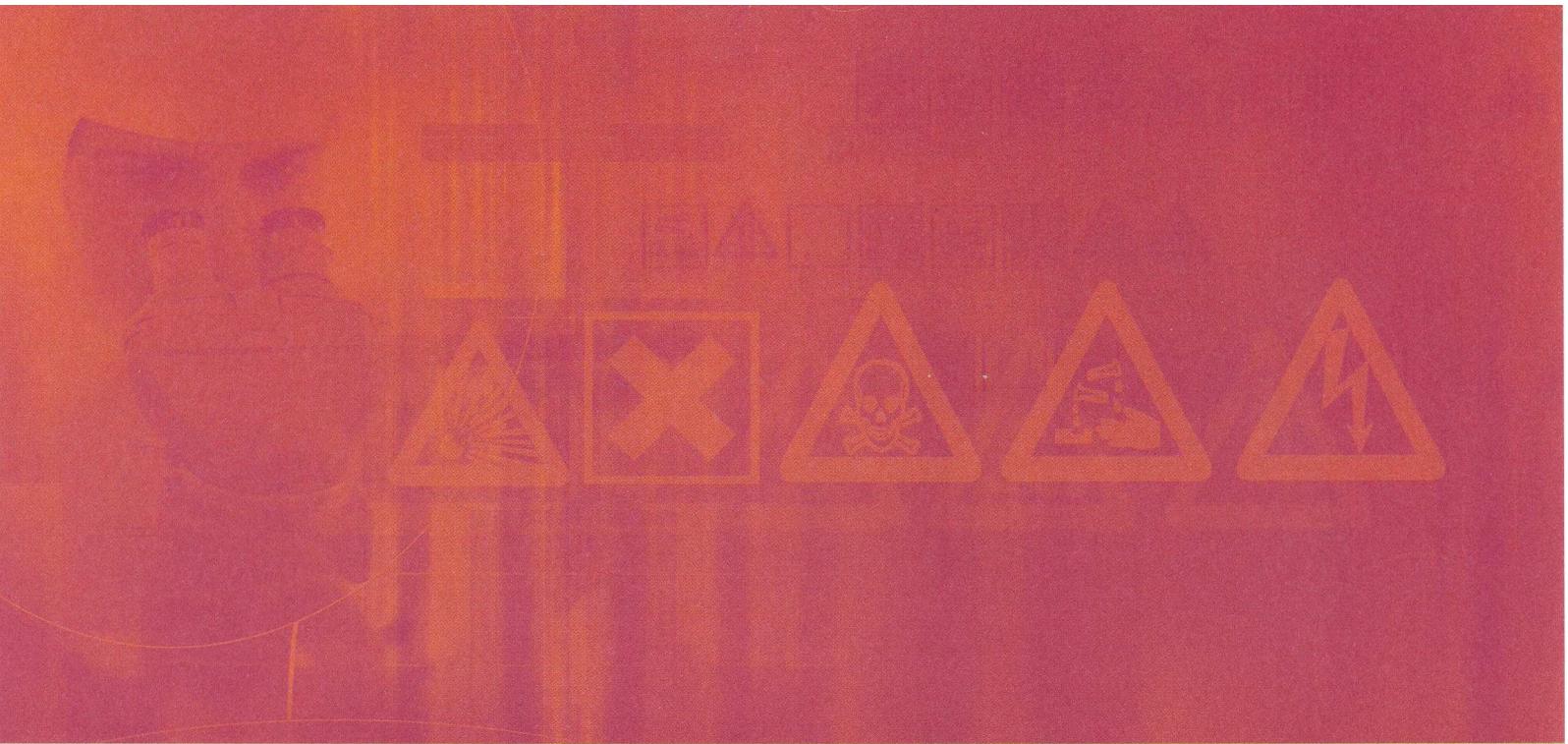
INERIS, CETE NC. (2008). *Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression*. Paris: Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. (2004, octobre). Guide Technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées.

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement Durables. (2004). *Plan de prévention des risques technologiques. Guide méthodologique*. Paris.

Robinson R.R., N. H. (1984, August 28-30). Vehicle overturning vulnerability from air blast loads. *Minutes at the Explosives Safety Seminar (21st)*. Houston, Texas, US: Illinois Institute of Technology Research Institute.

SNPE Ingénierie. (1994). Guide de sécurité pour la conception de salles de contrôle résistant à l'explosion dans les raffineries de pétrole et sur les sites pétrochimiques. Ministère de l'Ecologie.



*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet :** <http://www.ineris.fr>

