HAL
open science

Qualification des effets dominos sur les engins de transport

Frédéric Mercier, Brigitte Nedelec

To cite this version:

Frédéric Mercier, Brigitte Nedelec. Qualification des effets dominos sur les engins de transport. Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 18, Oct 2012, Tours, France. pp.NC. ineris-00973685

HAL Id: ineris-00973685

https://ineris.hal.science/ineris-00973685

Submitted on 4 Apr 2014

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

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

QUALIFICATION DES EFFETS DOMINOS SUR LES ENGINS DE TRANSPORT

QUALIFICATION OF DOMINO EFFECTS ON TRANSPORT UNITS

Mercier Frédéric
LIGERON®, Sonovision
Parc Les Algorithmes, Bâtiment Euclide,
F-91194 Saint Aubin Cedex
Phone +33 1 69 35 61 79
Fax +33 1 69 35 11 44
frederic.mercier@ligeron.com

Nedelec Brigitte
INERIS
Parc Alata BP 2
F-60550 Verneuil en Halatte
Phone +33 3 44 55 64 57
brigitte.nedelec@ineris.fr

Résumé
Cette publication présente une méthode d'étude des engins de transports vis-à-vis des agressions accidentelles. Les agressions accidentelles considérées sont des explosions (détonations et déflagrations) et des phénomènes thermiques. La réponse des structures est analysée pour les explosions en termes de glissement, renversement et rupture et, pour les phénomènes thermiques, en termes de température de propagation d'incendie et de températures conduisant à la rupture des réservoirs. Des corrélations permettent de qualifier la réponse des engins dans le domaine d'étude.

Summary
This paper presents a method to study the behavior of transport units subjected to accidental aggressions. The accidental aggressions are explosions (detonations as well as deflagrations) and thermal phenomena. The responses of the transport units are analyzed in terms of sliding, overturning and rupture for the explosions and, for the thermal phenomena, in terms of temperature levels leading to either fire propagation or tanks ruptures. Correlations qualifying the response of the transport units within the field of study are provided.

Eléments contextuels

Une prestation d'expertise technique a été demandée, par notification du 12 juin 2008, par la Direction Générale de la Mer et des Transports du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), d'une part, pour la mise au point et l'application de la réglementation internationale et nationale relative au transport des marchandises dangereuses, par voies terrestres, d'autre part, pour la mise en place d'une méthodologie d'études de dangers notamment dans le cadre de la mise en œuvre du décret 2007-700 du 3 mai 2007. La demande réglementaire de la prise en compte des effets domino figurant à l'article 1 du décret n° 2007-700 du 3 mai 2007 relatif aux études de dangers des ouvrages d'infrastructures de stationnement, chargement ou déchargement de matières dangereuses portant application de l'article L. 551-2 du code de l'environnement, il a été demandé aux auteurs de proposer des seuils en thermique et surpression à partir desquels les dommages sur les engins de transports terrestres (wagon, bateau et citerne routière) sont prévisibles.
Pour mémoire, un effet domino est un accident secondaire initié par un accident primaire. Dans le cadre de la présente demande, il s'agit d'élaborer une méthodologie permettant de définir des seuils permettant d'apprécier la vulnérabilité des engins de transport au regard de phénomènes dangereux (phénomènes thermiques et de surpression), provenant de leur voisinage.
Pour ce faire, il s'est agi :

1. tout d'abord, de définir les engins de transport à étudier ;
2. de caractériser les phénomènes dangereux ;
3. de définir les critères de vulnérabilité des engins de transport ;
4. d'élaborer les modèles permettant de traduire leur comportement vis-à-vis des phénomènes ;
5. enfin, de qualifier leur comportement.

1. Engins de transport étudiés

1.1 Introduction

Dans ce qui suit, les engins de transport étudiés sont les suivants :

- Conteneur maritime ;
- Conteneur-citerne maritime ;
- Camion-citerne ;
- Wagon-citerne gaz liquéfiés ;
- Wagon citerne chimique.

Leurs caractéristiques retenues en vue d'étudier leur comportement à l'agression sont les plus communes sur les sites susceptibles d'être impactés.

1.2 Conteneur maritime

Figure 1. Conteneur maritime

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

Table 1. Caractéristiques conteneur maritime

1.3 Conteneur citerne maritime

Figure 2. Conteneur citerne maritime

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

Tableau 2. Caractéristiques conteneur citerne maritime

1.4 Camion citerne

Le camion citerne retenu est de type gros porteur, à deux ou trois essieux. Ses caractéristiques retenues sont celles du Tableau 3.

Longueur (m)		12,6
Diamètre (m)		2,5
Hauteur (m)		4
Capacité (m^3)		54,5
Epaisseur (mm)		9
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 3. Caractéristiques camion citerne

1.5 Wagon citerne chimique

Les caractéristiques retenues pour le wagon citerne chimique sont celles du **Tableau 4**.

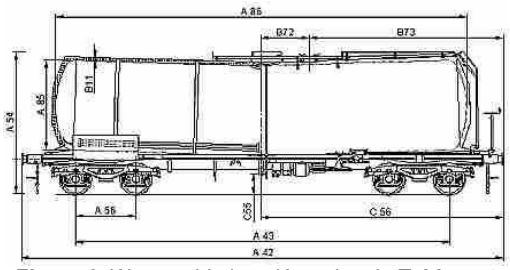

Figure 3. Wagon chimique légendes du **Tableau 4**

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

Tableau 4. Caractéristiques wagon citerne chimique

1.6 Wagon citerne de gaz liquéfié

Les caractéristiques retenues pour le wagon citerne de gaz liquéfiés sont celles du **Tableau 5**.

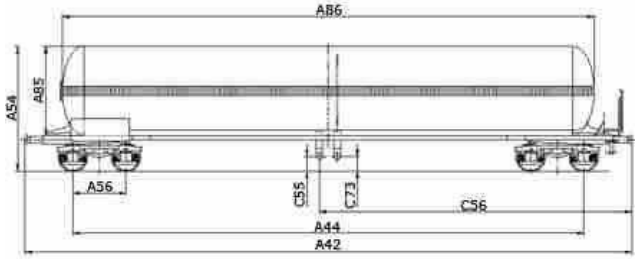

Figure 4. Wagon citerne gaz liquéfié légendes du **Tableau 4**

Longueur (m)		17,540 (A86)
Diamètre (m)		3,040 (A85)
Hauteur (m)		4,265 (A54)
Capacité (m^3)		120,308
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 5. Caractéristiques wagon citerne gaz liquéfié

2. <u>Phénomènes dangereux considérés</u>

2.1 Introduction

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

Surpression ;

Thermique.

Les paramètres liés à ces effets sont maintenant précisés.

2.2 Surpression

Deux types d'onde de surpression sont pris en compte dans le document. Dans ce qui suit, ΔP_{max} est la pression maximale, t le temps, t_+ la durée de phase positive :

- 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 :

$$p(t) = \begin{cases} \Delta P_{max} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) si\ t \le t_+ \\ 0\ si\ t > t_+ \end{cases} \qquad \{1\}$$

- 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 sinusoïdal avec une phase négative similaire en durée et en intensité à la phase positive. Cette onde est modélisée à l'aide de l'équation suivante :

$$p(t) = \begin{cases} \Delta P_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \; si \; t \leq 2 \cdot t_+ \\ 0 \; si \; t > 2 \cdot t_+ \end{cases} \quad \{2\}$$

Avec : $\omega = \frac{\pi}{t_+}$ {3}

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 (CSTB, 2008) et (INERIS, CETE NC, 2008).
L'exploitation des conséquences de surpression sur les structures est faite en termes de d'impulsion positive. L'impulsion positive I_+ est définie comme l'aire sous la courbe de pression de la phase positive (voir **Figure 5** et **Figure 6**).
Ainsi :

- pour la détonation :

$$I_+ = \frac{\Delta P_{max} \cdot t_+}{2} \quad \{4\}$$

- pour la déflagration :

$$I_+ = \frac{2 \cdot \Delta P_{max} \cdot t_+}{\pi} \quad \{5\}$$

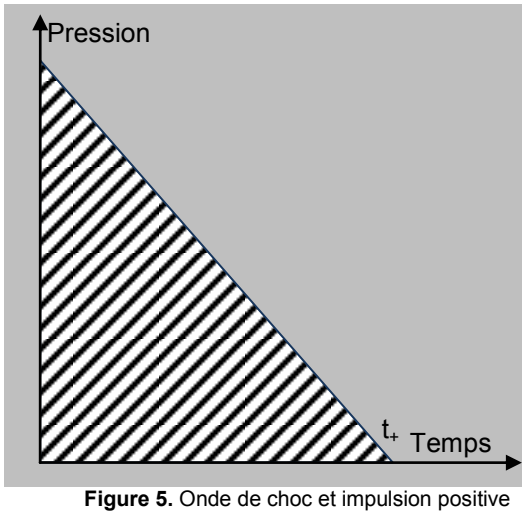

Figure 5. Onde de choc et impulsion positive

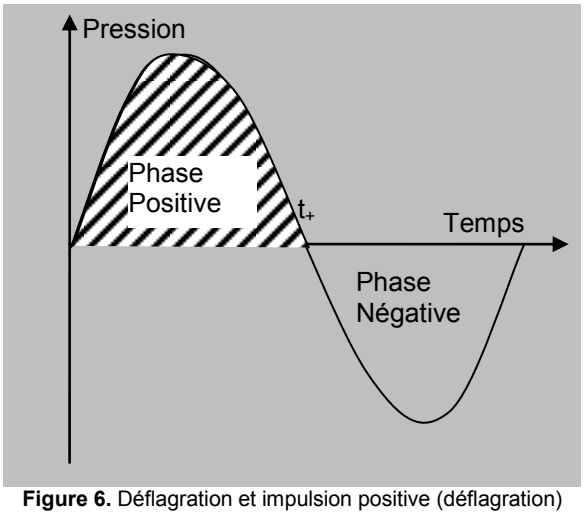

Figure 6. Déflagration et impulsion positive (déflagration)

Le **Tableau 6** traduit les types d'explosion considérés dans l'étude. 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). A la différence du tableau de cette référence, deux niveaux de remplissage ont été considérés pour les installations mobiles dans le cas du BLEVE :
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.
Ce tableau permet d'estimer les temps d'application des agressions considérées. L'emploi de la valeur supérieure du domaine permet d'être sécuritaire.

Type d'explosion	Type produits ou installation	Temps d'application ms	Masse / Volume inflammable
UVCE en champ libre	Gaz Inflammables Liquides inflammables (Déflagration)	0-20	< 400 g (5 m^3)
		20-50	400 g (5 m^3) – 5 kg (65 m^3)
		50-100	5 kg (65 m^3) – 50 kg (650 m^3)
		100-150	50 kg (650 m^3) – 150 kg (2 000 m^3)
		150-1000	150 kg (2 000 m^3) – 50 t (650 000 m^3)
		>1000	>50 t (650 000 m^3)
	Hydrogène (Déflagration)	0-20	< 2 kg (80 m^3)
		20-50	2 kg (80 m^3) – 30 kg (1 500 m^3)
		50-100	30 kg (1 500 m^3) – 230 kg (10 000 m^3)
		100-150	230 kg (10 000 m^3) – 830 kg (38 000 m^3)
		150-1000	830 kg (38 000 m^3) – 250 t (12 000 000 m^3)
UVCE en milieu encombré	Gaz Inflammables Liquides inflammables (Déflagration)	0-20	< 5 kg (65 m^3)
		20-50	5 kg (65 m^3) – 100 kg (1300 m^3)
		50-100	100 kg (1300 m^3) – 700 kg (9 000 m^3)
		100-150	700 kg (9 000 m^3) – 2.5 t (32 000 m^3)
		150-1000	2.5 t (32 000 m^3) – 750 t (10 000 000 m^3)
	Hydrogène (Onde de choc)	0-20	< 2 kg (80 m^3)
		20-100	2 kg (80 m^3) – 230 kg (10 000 m^3)
		100-150	230 kg (10 000 m^3) – 830 kg (38 000 m^3)
		150-500	830 kg (38 000 m^3) – 32 t (1 500 000 m^3)
BLEVE (onde de choc)	Installation fixe	0-20	< 10 m^3
		20-100	10 – 1 500 m^3
		100-150	1 500 – 5 000 m^3
		150-500	>5 000 m^3
	Installation mobile	20-40	20 -150 m^3 (remplissage à 10 %)
	Installation mobile	10-25	20 -150 m^3 (remplissage à 85 %)
Eclatement réservoir (onde de choc)	Hydrocarbures	0-20	< 1 000 m^3
		20-100	1 000 – 100 000 m^3
		100-150	> 100 000 m^3
Explosion de solide (onde de choc)	Engrais (nomenclature 1331)	0-20	< 650 kg
		20-100	650 kg – 85 t
		100-150	85 t – 285 t
		150 - 500	285 t – 10 000 t
		> 500	> 10 000 t
	Explosifs (kg éq. TNT)	0-20	< 20 kg
		20-100	20 kg – 2,5 t
		100-150	2,5 t – 8,5 t
		150 - 500	8,5 t – 300 t
		> 500	> 300 t

Tableau 6. Explosions considérées

3. Agressions thermiques

Pour ce qui est des agressions thermiques, trois types de phénomènes ont été pris en compte :

1. Un rayonnement continu. Ce rayonnement résulte d'un phénomène thermique continu de type feu de nappe, incendie, feu torche… Un phénomène est considéré comme continu si sa durée excède

2 minutes. A ce titre, les phénomènes considérés sont de type feu torche, feu de nappe ou feu de solides. La densité de flux appliquée aux structures est le seuil des effets létaux significatifs (SELS) : 8 kW/m².

2. Un rayonnement transitoire sous forme de rampe, lié à un BLEVE ou un Boil Over classique, couche mince ou une pressurisation de bac. Dans le cas du BLEVE, le phénomène accidentel résulte de la rupture de réservoirs remplis de gaz liquéfié. 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 les autres cas, il représente le flux thermique émis par une boule de feu que les modèles classiques présentent comme persistante pendant toute la durée du phénomène. Dans ce cas, le seuil appliqué aux structures n'est pas la densité de flux thermique, mais la dose thermique DT qui s'exprime avec Φ la densité de flux et t le temps comme :

$$DT = \int_{t=0}^{T} \Phi^{\frac{4}{3}} \cdot dt \qquad \{6\}$$

La dose thermique est également imposée au seuil des effets létaux significatifs, soit 1800 [(kW/m²)$^{4/3}$].s.

3. Un feu de nuage (ou feu éclair) qui caractérise le phénomène d'inflammation d'un nuage gazeux sans explosion. 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. La durée du feu de nuage est supposée correspondre à la propagation de la flamme à travers la totalité du nuage, soit, pour un nuage de 200 mètres et une flamme se propageant à 60~70 m/s, trois secondes tout au plus. La température de flamme est d'environ 1800°C. Ses effets sur les structures par rayonnement distant seront pratiquement nuls. Au voisinage des structures, l'échauffement est considéré par échange direct entre la flamme et la structure. En termes d'intensité appliquée, il n'est pas question de dose thermique, mais de durée d'échauffement liée à la taille du nuage. Dans le présent document, la taille du nuage est définie par la limite inférieure d'inflammabilité (LII).

4. Critères de vulnérabilité des engins de transport

La vulnérabilité des engins de transports est donc étudiée sous deux aspects :

- Un aspect mécanique en termes de résistances à la rupture et au renversement. Sous l'effet de l'onde de surpression, un engin de transport peut suivant les cas, glisser, se renverser en cas de blocage ou rompre.
- Un aspect thermique en termes de résistance à l'échauffement. L'échauffement peut avoir des conséquences sur la structure en termes d'inflammation de son contenu (conteneur) ou de ruine de l'enveloppe par échauffement ou sous l'effet de la dilatation de la phase liquide (citerne).

Le tableau suivant dresse les différents cas d'étude pour chaque engin de transport considéré.

Engin de transport	Vulnérabilité mécanique	Vulnérabilité thermique
Conteneur maritime	• Glissement, suivi du renversement ; • Renversement seul (blocage au sol) ; • Rupture.	Elévation de température supérieure à 140°C ou température supérieure à 180°C en face non exposée à l'agression thermique
Conteneur citerne maritime	• Glissement, suivi du renversement ; • Renversement seul (blocage au sol) ; • Rupture.	Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne et élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise à l'agression thermique
Camion citerne	• Glissement, suivi du renversement ; • Renversement seul (blocage au sol) ; • Rupture.	Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne et élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise à l'agression thermique
Wagon citerne chimique	• Renversement seul blocage par les rails) ; • Rupture.	Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne et élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise à l'agression thermique
Wagon citerne de gaz liquéfié	• Renversement seul blocage par les rails) ; • Rupture.	Elévation de température supérieure à 35°C dans le liquide en interne et élévation de température supérieure à 500°C pour l'enveloppe soumise à l'agression thermique

Tableau 7. Critères de vulnérabilité considérés pour les engins de transport

5. Modèles considérés

5.1 Mécanique

5.1.1 Glissement et renversement d'engins de transport sous l'effet d'une onde de surpression

L'angle de renversement est défini comme étant celui pour lequel le centre d'inertie passe au dessus du centre de rotation. Le problème du glissement et du renversement des engins de transport au stationnement sous l'effet d'une onde de pression se pose ainsi :

Une onde de pression atteint l'engin de transport :

- En cas de glissement, l'inertie et la position du centre d'inertie du véhicule peuvent être suffisante pour le faire incliner dans la direction opposée au souffle (problème du patineur). Toutefois, pour que cette inclinaison ne soit pas négligeable, les ordonnées des centres d'inertie et de poussée ne doivent pas être confondus ou proches ;
- En absence de glissement (blocage), la pression peut être suffisante pour provoquer le décollement des roues du côté du souffle.
- L'inclinaison de l'engin de transport dépasse l'angle de renversement.
- Le véhicule tombe alors sur le flanc.

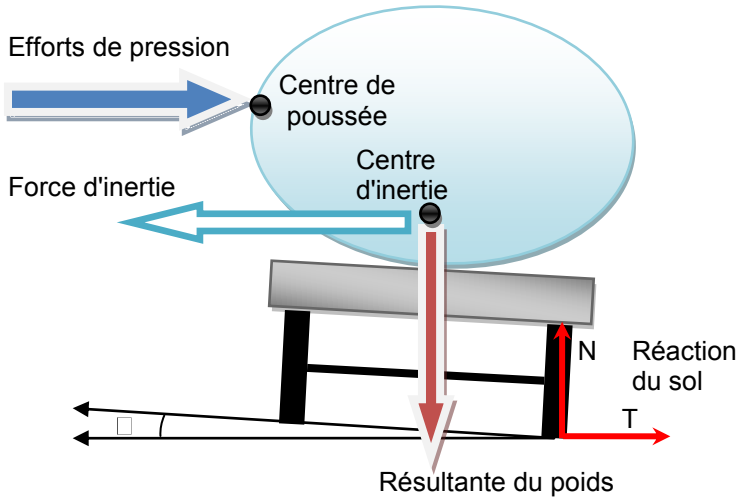

Figure 7. Forces s'exerçant sur un engin de transport soumis à un effet de surpression

Dans tout ce qui suit, l'hypothèse du mouvement de corps rigide est faite. Les équations de la dynamique et du moment cinétique permettent d'établir les équations donnant le glissement et le renversement.
Le glissement est décrit à l'aide de

$$\vec{P}+\vec{F}+\vec{R}=m\cdot\vec{a}_G \qquad \{7\}$$

Avec :

- $\vec{P}$: Poids de l'engin ;
- $\vec{F}$: Résultante des efforts de pression ;
- $\vec{R}$: Réaction du support (y compris frottements) ;
- $\vec{a}_G$: Accélération du centre d'inertie ;
- m : masse de l'engin.

Soit $\mathcal{R}$(0, x, y, z) le repère galiléen d'origine 0 et $\mathcal{R}_s$(0', x', y', z') le repère d'origine 0' attaché au solide. 0' est le centre de rotation du solide qui peut également subir une translation en cas de glissement. L'équation suivante décrit le renversement :

$$J_x\cdot\ddot{\theta}=M_F(\theta)-M_w(\theta)-M_{Fl}(\theta) \qquad \{8\}$$

Avec :

- t : temps ;
- : angle de rotation ;
- J_x : moment d'inertie en rotation ;
- M_F : moment des efforts de pression ;
- M_w : moment de la masse ;
- M_{Fl} : moment des forces d'inertie liées à l'accélération rectiligne en cas de glissement. Dans le cas d'un blocage (rail, obstacle, trottoir…) ou en absence de déplacement latéral, ce moment est nul. $\Gamma_a(O')$ est l'accélération absolue de O'.

$$\vec{M}_{Fl}=-m\cdot\vec{O'O}\wedge\Gamma_a(O') \qquad \{9\}$$

Pour une citerne remplie partiellement de liquide, le déplacement du centre d'inertie du liquide est pris en compte. En effet, il influence tout à la fois le déplacement du centre d'inertie global et la valeur du moment d'inertie global. Toutefois, dans ce modèle approximatif, hors déplacement du centre d'inertie, les effets du déplacement du fluide par ballotement ne sont pas pris en compte.
Les deux équations sont des Equations Différentielles Ordinaires du 2ème ordre, la première étant quasi linéaire, la deuxième non linéaire. Elles sont résolues au moyen de codes explicites.

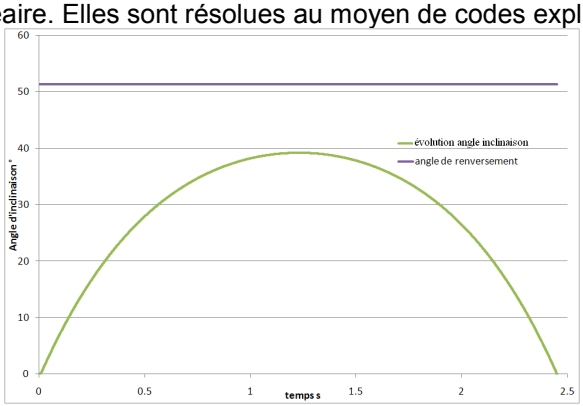

Figure 8. Exemple de résolution du problème de renversement d'un camion citerne soumis à une onde de choc (non renversement)

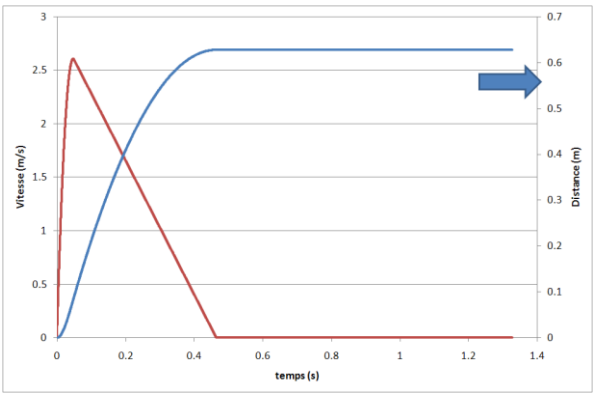

Figure 9. Exemple de résolution du problème de glissement d'un camion citerne soumis à une onde de choc

5.1.2 Rupture

La résistance à la rupture des structures aux explosions est réalisée de façon classique à l'aide des méthodes développées par l'armée américaine dans son document UFC 3-340-02 (Structures to resist the effects of accidental explosions).

5.2 Thermique

La réponse des structures aux agressions thermiques est modélisée à l'aide du logiciel Thermette de l'école des Mines de Paris. Le modèle thermique prend en compte :

- les échanges par rayonnement ou condition en température imposée avec le phénomène dangereux ;
- les échanges avec l'ambiance externe en convection naturelle et rayonnement ;
- les échanges avec l'ambiance interne en convection naturelle. La température de l'ambiance interne peut évoluer en fonction des échanges thermiques avec la cible.

La cohérence du modèle a été vérifiée par confrontation des résultats obtenus avec les mesures de températures effectuées sur une citerne cylindrique d'ammoniac soumise au rayonnement solaire.

6. Résultats

6.1 Introduction

Les résultats sont présentés sous la forme de tableaux campant :

- Pour le glissement, les fonctions de corrélation donnant :
  - la distance parcourue sous l'effet de la surpression ;
  - l'impulsion en fonction de la durée du signal conduisant au renversement.
- Pour le renversement (blocage), la fonction de corrélation donnant l'impulsion en fonction de la durée du signal conduisant au renversement.
- Pour la rupture, l'impulsion en fonction de la durée à partir de laquelle la ruine peut se produire.
- Pour les agressions thermiques :
  - Pour les phénomènes continus, la durée pendant laquelle la structure résiste au Seuil des Effets Létaux Significatifs ;
  - Pour les phénomènes transitoires, la résistance au BLEVE d'un porteur 47 m^3 au SELS (cas majorant) ;
  - Pour le feu éclair, la taille du nuage conduisant à la ruine de la structure.

A titre d'exemple, les résultats des simulations pour le glissement et le renversement du conteneur maritime vide sont communiqués sur les figures ci-dessous.

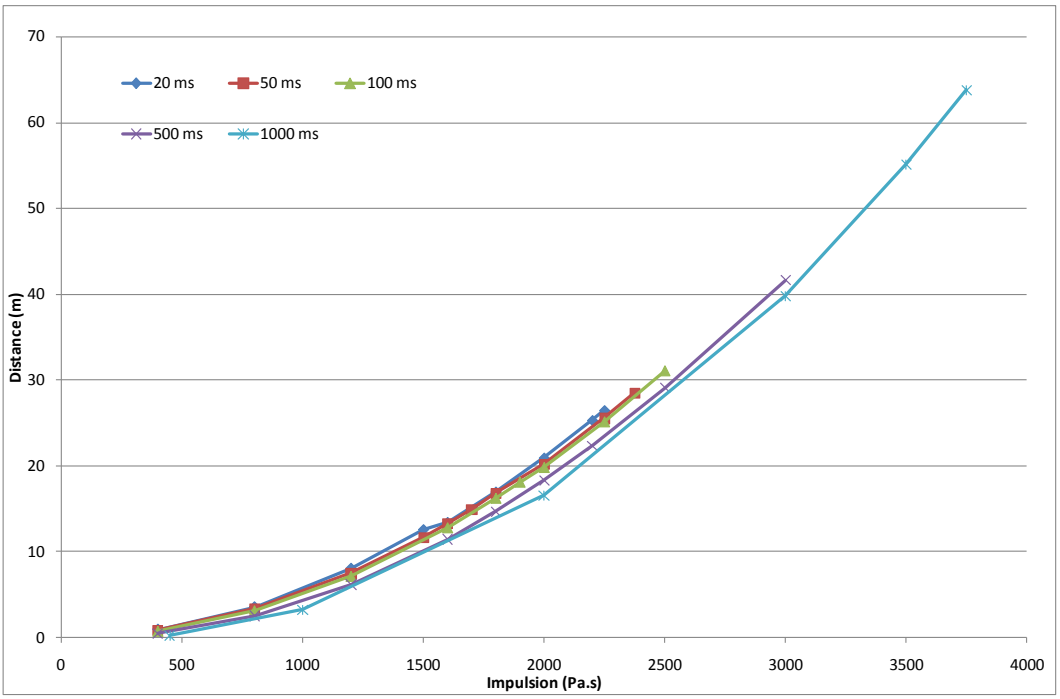

Figure 10. Distances de glissement obtenues en fonction de l'impulsion d'ondes de choc de temps d'application différents

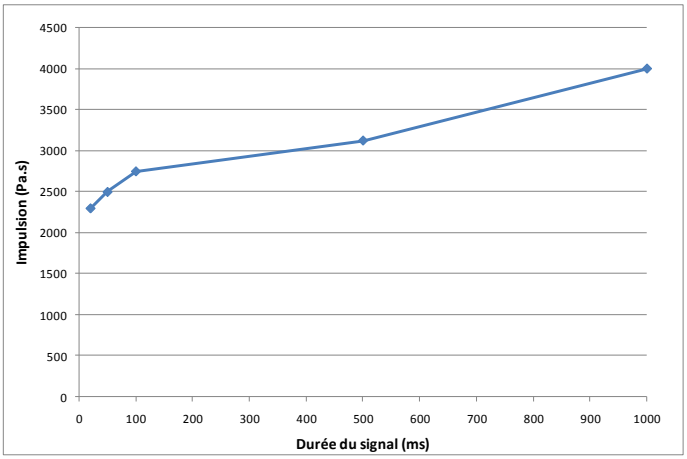

Figure 11. Impulsions provoquant le renversement après glissement

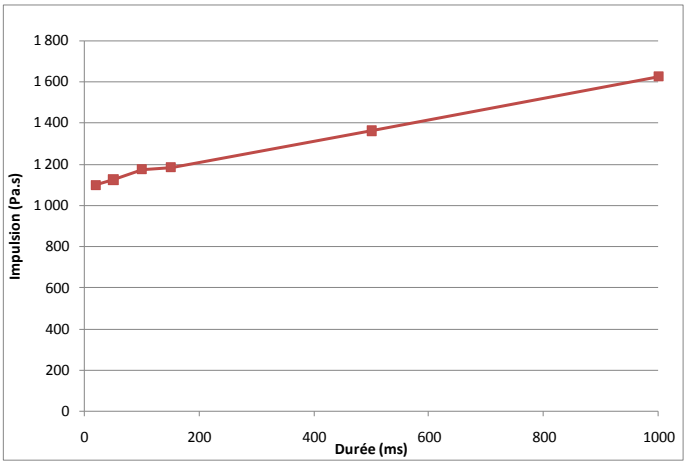

Figure 12. Impulsions pour lesquelles le renversement sans glissement est obtenu (onde de choc)

6.2 Synthèse pour le conteneur maritime

Phénomène	Conteneur maritime	
	Vide	Plein
Glissement statique		
Force	10,3 kN (1,05 tonne)	103 kN (10,5 tonnes)
Pression	700 Pa (7 mbar)	7 000 Pa (70 mbar)
Glissement dynamique		
Loi distance = f(impulsion)	0,0249·t – 30,986	0,0028·t – 37,845
Loi impulsion = f(temps)	1,46·t+2287,3	16,962·t + 25085
Renversement statique		
Angle de renversement	54°	44°
Force	12 kN (1,1 tonne)	107 kN (11 tonnes)
Pression	8 mbar	68 mbar
Renversement dynamique		
ODC : loi impulsion = f(temps)	0,769·t + 1052,2	6,734·t+11854
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$4{,}206 \cdot 10^5$ /t + 1247,33	$4{,}6978 \cdot 10^6$ /t + 9637
Mode de rupture		
ODC : loi impulsion = f(temps)	0,5908·t+24,488	
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	1,1614·t-11,915	
Agressions thermiques		
Flux continu (SELS)	Durée ≥ 19 minutes	
BLEVE de porteur 47 m^3 (SELS)	Sans effet	
Feu éclair (SEL / SELS)	Taille du nuage(LII) ≥ 165 mètres	

Tableau 8 Synthèse pour le conteneur maritime (t est en ms) – ODC onde de choc

6.3 Synthèse pour le conteneur citerne maritime

Phénomène	Conteneur citerne maritime	
	Vide	Plein
Glissement statique		
Force	12,02 kN (1,225 tonne)	123,6 kN (12,6 tonnes)
Pression	850 Pa (8,5 mbar)	6565 Pa (66 mbar)
Glissement dynamique		
Loi distance = f(impulsion)	$\left(7{,}107 \cdot 10^{-5} + \frac{311262}{t^2}\right)^{-1}$	0,0039797·t-122,689
Loi impulsion = f(temps)	21,6913·t+7880,09	ln y= 9,0721 + 0,0013912·t
Renversement statique		
Angle de renversement	45°	45°
Force	13 kN (1,3 tonne)	129 kN (13,2 tonnes)
Pression	9 mbar	87 mbar
Renversement dynamique		
ODC : loi impulsion = f(temps)	0,76897727·t+1052,16	6,73238·t+11853,676
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{6855932 + \frac{20955703 \cdot 10^4}{t^2}}$	$\sqrt{566322 \cdot 10^3 + \frac{339306 \cdot 10^8}{t^2}}$
Mode de rupture		
ODC : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{15042897 \cdot 10^2 + 18565 \cdot t^2}$	
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$17239 + 15{,}4 \cdot t + 0{,}2285 \cdot t^2 + \frac{1{,}79679 \cdot 10^6}{t}$	
Agressions thermiques		
Chlore		
Flux continu (SELS)	Durée ≥ 1,9 heure	
BLEVE de porteur 47 m^3 (SELS)	Sans effet	
Feu éclair (SEL / SELS)	Taille du nuage(LII) ≥ 910 mètres	
NH3 liquide		
Flux continu (SELS)	Durée ≥ 2,1 heures	
BLEVE de porteur 47 m^3 (SELS)	Sans effet	
Feu éclair (SEL / SELS)	Taille du nuage(LII) ≥ 910 mètres	
Butane		
Flux continu (SELS)	Durée ≥ 2 heures	
BLEVE de porteur 47 m^3 (SELS)	Sans effet	
Feu éclair (SEL / SELS)	Taille du nuage(LII) ≥ 910 mètres	

Tableau 9. Synthèse pour le conteneur citerne maritime (t est en ms) – ODC onde de choc

6.4 Synthèse pour le camion citerne

Phénomène	Camion citerne	
	Vide	Plein
Glissement statique		
Force	12,02 kN (1,225 tonne)	123,6 kN (12,6 tonnes)
Pression	850 Pa (8,5 mbar)	6565 Pa (66 mbar)
Glissement dynamique		
Loi distance = f(impulsion)	$\left(-1{,}16915829 + \frac{143{,}3574490}{t^{0,5}}\right)^{-1}$	$\left(-0{,}65749323 + \frac{1140{,}7449470}{t^{0,5}}\right)^{-1}$
Loi impulsion = f(temps)	$\left(0{,}000348261 - 7{,}8433 \cdot 10^{-6} \cdot t^{0,5}\right)^{-1}$	$\left(0{,}000128149 - 3{,}1495 \cdot 10^{-6} \cdot t^{0,5}\right)^{-1}$
Renversement statique		
Angle de renversement	45°	45°
Force	13 kN (1,3 tonne)	129 kN (13,2 tonnes)
Pression	9 mbar	87 mbar
Renversement dynamique		
ODC : loi impulsion = f(temps)	1,6727·t+3034,3	3,6555·t+7295,3
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{2{,}77705 \cdot 10^{7} + \frac{3{,}13329 \cdot 10^{12}}{t^{2}}}$	$\sqrt{1{,}89588 \cdot 10^{8} + \frac{2{,}47275 \cdot 10^{13}}{t^{2}}}$
Mode de rupture		
ODC : loi impulsion = f(temps)	208,09·t+16796	
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{4.10584 \cdot 10^{8} + \frac{22471.12505}{t^{2}}}$	
Agressions thermiques		
Chlore		
Flux continu (SELS)	Au bout de 2,9 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 3,1 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 10. Synthèse pour le camion citerne (t est en ms) – ODC onde de choc

6.5 Synthèse pour le wagon citerne gaz liquéfié

Phénomène	Wagon citerne gaz liquéfié	
	Vide	Plein
Renversement statique		
Angle de renversement	45°	45°
Force	13 kN (1,3 tonne)	129 kN (13,2 tonnes)
Pression	9 mbar	87 mbar
Renversement dynamique		
ODC : loi impulsion = f(temps)	2,3716·t+5066,0341	5,5602·t+12907,1477
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{6{,}84467 \cdot 10^{7} + \frac{1{,}17284 \cdot 10^{13}}{t^2}}$	$\sqrt{4{,}90046 \cdot 10^{8} + \frac{8{,}34341 \cdot 10^{13}}{t^2}}$
Mode de rupture		
ODC : loi impulsion = f(temps)	435,4847·t+ 72597,1733	
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{6{,}0062 \cdot 10^{9} + 113077{,}2439 \cdot t^{2} \cdot \ln(\ )}$	
Agressions thermiques		
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 11. Synthèse pour le wagon citerne GPL (t est en ms) – ODC onde de choc

6.6 Synthèse pour le wagon citerne chimique

Phénomène	Wagon citerne chimique	
	Vide	Plein
Renversement statique		
Angle de renversement	45°	45°
Force	13 kN (1,3 tonne)	129 kN (13,2 tonnes)
Pression	9 mbar	87 mbar
Renversement dynamique		
ODC : loi impulsion = f(temps)	2,0736·t + 4362,6636	7,8659·t + 16654
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{5{,}54444 \cdot 10^{7} + \frac{8{,}9194 \cdot 10^{12}}{t^2}}$	$\sqrt{8{,}50808 \cdot 10^{8} + \frac{1{,}4498 \cdot 10^{14}}{t^2}}$
Mode de rupture		
ODC : loi impulsion = f(temps)	$\sqrt{1{,}41564 \cdot 10^{9} + 17915{,}08170 \cdot t^{2}}$	
Déflagration : loi impulsion = f(temps)	58358,69697+0,000200342·t^3	
Agressions thermiques		
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	

Tableau 12. Synthèse pour le wagon citerne chimique (t est en ms) – ODC onde de choc

Conclusions

Le travail réalisé démontre la possibilité d'étudier les effets domino sur les engins de transport autrement que par la simple application des valeurs seuils de l'Arrêté du 29/09/05 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.

Il montre que la réponse des engins de transport aux phénomènes de surpression varie tout à la fois avec leur intensité, leur temps d'application, ainsi que leur nature (onde de choc / déflagration).

Pour ce qui est de phénomènes thermiques, l'étude démontre que les engins de transport sont plus sensibles aux phénomènes continus qu'aux phénomènes transitoires.
Par ailleurs, la présente étude amène des questionnements sur la forme retenue pour le signal de pression en déflagration, la phase négative du signal retenu semblant perturber la réponse de l'engin de transport.
Enfin, il conviendrait d'étendre l'étude à d'autres classes d'engins de transport.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Références

Department of Defense, 2008, UFC 3-340-02, 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.
INERIS, 2010, Rapport d'étude INERIS N° 10-103154-05255B Cahier scientifique de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires. Paris: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire .
INERIS, 2010, Rapport d'étude INERIS N° DRA-09-103030-13036B, Développement d'une méthodologie de qualification des effets domino sur les engins de transport. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire.
INERIS, CETE NC. (2008). Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression. Paris: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, 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.
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.