



RAPPORT D'ÉTUDE
INERIS-DRA-2007-N° 46055/77288

10/01/2007]

]

**Formalisation du savoir et des outils dans le
domaine des risques majeurs
(DRA-35)**

La résistance des structures aux actions
accidentelles

**Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs
(DRA-35)**

La résistance des structures aux actions accidentelles

Direction des Risques Accidentels

Unité Résistance des Structures

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

B. DEBRAY – S. DUPLANTIER – C. PROUST – G. MAVROT – F. MERCIER –
S. RICHOMME – M. REIMERINGER

PREAMBULE

Le présent document a été établi :

- au vu des données scientifiques et techniques disponibles ayant fait l'objet d'une publication reconnue ou d'un consensus entre experts,
- au vu du cadre légal, réglementaire ou normatif applicable.

Il s'agit de données et informations en vigueur à la date de l'édition du document, avril 2005.

Le présent document comprend des propositions ou recommandations. Il n'a en aucun cas pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'une partie prenante.

PAGE DE VALIDATION			
La résistance des structures aux actions accidentelles			
Rédaction initiale			
Auteurs	Qualité	Date	Emargement
Mathieu REIMERINGER (Coordination)	Ingénieur de l'Unité Résistance des Structures		
Frédéric MERCIER	Ingénieur de l'Unité Résistance des Structures		
Sébastien RICHOMME	Ingénieur de l'Unité Résistance des Structures		
Dans le cadre de la procédure générale qualité de l'INERIS et en respect du paragraphe 14.2 du manuel qualité, ce document a fait l'objet de relectures et d'un contrôle par des vérificateurs.			
Vérificateur final	Qualité	Date	Emargement
Bruno DEBRAY	Responsable du programme DRA 35		
Approbateur	Qualité	Date	Emargement
Bruno FAUCHER	Directeur de la Direction des Risques Accidentels		

TABLE DES MATIERES

1. OBJECTIF ET DOMAINE D'APPLICATION	7
1.1 Contexte général	7
1.2 Objectifs	7
1.3 Domaine d'application	8
1.4 Plan retenu	8
1.5 Contexte réglementaire	8
1.6 Questions pratiques auxquelles peut répondre ce référentiel.	9
2. LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES AUX EXPLOSIONS.....	11
2.1 Le chargement.	11
2.1.1 Généralités.	11
2.1.2 Explosion en champ libre.....	11
2.1.3 Explosion en milieu confiné.	12
2.2 Interaction fluide-structure.....	14
2.2.1 Phénomènes de réflexion ou d'écran.	14
2.2.2 Phénomènes de propagation.....	16
2.3 Méthodes de calcul de la résistance des structures.....	17
2.3.1 Méthodes forfaitaires.	17
2.3.1.1 Méthodes fondées sur des niveaux de pression.	17
2.3.1.2 Méthodes fondées sur des diagrammes P-I.....	20
2.3.1.3 Traitement statistique.....	21
2.4 Méthode analytique.....	21
2.4.1 Calcul statique linéaire équivalent.	23
2.4.1.1 Méthode de Pfoertner.....	23
2.4.1.2 Méthode du Dynamic Load Factor (DLF) [MEDD SNPE 1994]	23
2.4.2 Calcul dynamique non linéaire.....	25
2.5 Méthode numérique.	26
2.6 Moyens de protection.....	28
2.6.1 Principes généraux.....	28
2.6.2 Diminuer les niveaux de pression.....	28
2.6.2.1 Murs écrans.....	28

2.6.2.2 Surfaces soufflables.....	29
2.6.3 Modifier les paramètres mécaniques.....	30
2.7 Références bibliographiques.....	30
3. RÉSISTANCE DES STRUCTURES AUX EFFETS THERMIQUES	35
3.1 Introduction	35
3.2 Influence de la température sur les caractéristiques des matériaux.....	36
3.2.1 Introduction.....	36
3.2.2 Acier	36
3.2.2.1 Affaiblissement des propriétés mécaniques	36
3.2.2.2 Conductivité thermique.....	37
3.2.2.3 Dilatation thermique	37
3.2.3 Béton	39
1.1.1.1 Mécanismes de dégradation	39
3.2.3.1 Affaiblissement des propriétés mécaniques	40
3.2.3.2 Dilatation	41
3.2.3.3 Conductivité thermique.....	41
3.3 Modélisation de l'agression	41
3.3.1 Introduction.....	41
3.3.2 Modèles radiatifs.....	41
3.3.3 Courbes température / Temps	43
3.3.4 Codes à zones.....	44
3.3.5 Codes à champs.....	45
3.4 Réponse des structures	46
3.4.1 Introduction.....	46
3.4.2 Feu externe - Approche forfaitaire	47
3.4.3 Méthodes de calcul.....	48
3.4.3.1 Méthode simplifiée	49
3.4.3.1.1 Température critique	49
3.4.3.1.2 Section réduite	51
3.4.3.2 Méthode avancée.....	51
3.5 Moyens de protection	52
3.6 Références bibliographiques.....	53
4. LES MOYENS EXPÉRIMENTAUX AU SERVICE DE LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES AUX ACTIONS ACCIDENTELLES.....	56

4.1	Généralités.....	56
4.2	Essais statiques	56
4.2.1	Les tests matériaux.....	56
4.2.1.1	Essai de traction (NF EN 10002-1).....	57
4.2.1.2	Essai de compression (NF EN 12390-4)	60
4.2.1.3	Essai de flexion (NF EN 12390-5)	61
4.2.2	Test sur des éléments	63
4.2.3	Test en température	64
4.3	Essais dynamiques	67
4.3.1	Essais matériaux	68
4.3.1.1	Essai de Charpy (NF EN 140045-1).....	68
4.3.1.2	Barres de Hopkinson.....	69
4.3.1.2.1	Compression	69
4.3.1.2.2	Traction	69
4.3.1.2.3	Flexion.....	71
4.3.1.3	Essai plaque-plaque.....	72
4.3.1.4	Essai de Taylor.....	72
4.3.2	Les tests sur les éléments.....	72
4.3.2.1	Le principe de similitudes.....	72
4.3.2.2	Les essais	74
4.4	Les tests à grande échelle.....	75
4.5	Références Bibliographiques.....	75
5.	UN SUJET TRANSVERSAL EN RÉSISTANCE DES STRUCTURES : LE RISQUE D'EFFONDREMENT EN CHAÎNE.....	78
5.1	Un sujet de recherche d'actualité.....	78
5.2	Historique.....	78
5.3	Normes européennes.....	78
5.4	Simulation numérique.....	79
5.5	Références bibliographiques.....	80
6.	CONCLUSION.....	81
	ANNEXE.....	82
	FICHE RECAPITULATIVE SUR LA RESISTANCE DES STRUCTURES AUX ACTIONS ACCIDENTELLES.....	82

2.3 METHODES DE CALCUL DE LA RESISTANCE DES STRUCTURES.

Le comportement des structures soumises à des ondes de pression n'est pas seulement fonction de l'intensité (surpression maximale) de l'onde reçue, mais également de sa durée et de sa forme.

Les méthodes employées pour déterminer la résistance des structures aux actions accidentelles sont de trois types :

- les méthodes empiriques qui sont les plus fréquemment utilisées pour l'évaluation des effets. On rencontre principalement des tableaux de dommages en fonction du niveau de pression (qualifiés par la suite de méthodes forfaitaires) et des diagrammes P-I (pression – impulsion);
- les méthodes analytiques qui utilisent principalement une analogie masse ressort pour calculer un niveau de contrainte dans la structure qui est ensuite comparé à la contrainte à la rupture afin de déterminer si la structure reste intègre. Dans le domaine des risques accidentels l'approche en « pression-temps » est la plus pertinente. Le modélisateur a le choix entre :
 - un calcul statique élastique linéaire équivalent ;
 - un calcul dynamique non linéaire.

Ces méthodes sont détaillées plus loin.

- Les méthodes numériques qui permettent de coupler un code CFD donnant le champs de pression appliqué à la structure à un code éléments finis permettant d'avoir la répartition de contraintes dans la structure.

2.3.1 METHODES FORFAITAIRES.

2.3.1.1 METHODES FONDEES SUR DES NIVEAUX DE PRESSION.

Une approche empirique fréquemment utilisée pour l'évaluation des effets relie les niveaux de pression aux dommages observés. Cette méthode est très utile et facile d'utilisation, en revanche elle occulte complètement la prise en compte du temps d'application et de la forme du signal. Ainsi pour des structures présentant un intérêt stratégique (effets domino possibles, perte économique potentielle importante...) ou pour dimensionner des moyens de protection, on préférera une approche analytique ou numérique.

Numéro	Type de dégâts constatés	Seuil (mbar)
1	Bruit de fond (137 dB, si basse fréquence 10-15Hz)	1 à 2
2	Bris de vitre occasionnel pour des vitres fragiles c'est-à-dire de grandes vitres peu épaisses	2
3	Bruit important (143 dB), "boum" sonique avec bris de glaces	2 à 3
4	Bris de vitre de grande dimension (INRS), (baies vitrées)	5 à 10
5	5% des vitres cassées (BIT), ces vitres sont prises au hasard	7 à 10

	petites ou grandes	
6	10% des vitres brisées et limites des petits dommages (INRS)	20
7	50% des vitres cassées (BIT)	14 à 30
8	Dégâts structurels mineurs, cloisons et éléments de menuiserie arrachés, tuiles soufflées (BIT)	30 à 60
9	Bris notables de vitres (à 70 mbar a priori presque toutes cassées, petites et grandes) et parfois dislocation des châssis (INRS)	40 à 70
10	Portes et fenêtres enfoncées (BIT)	60 à 90
11	Le toit d'un réservoir de stockage a cédé	70
12	Joints entre des tôles ondulées en acier ou en aluminium arrachés	70 à 140
13	Lézardes et cassures dans les murs légers (plâtre, fibrociment, bois, tôle) toiture en fibrociments quasiment détruite	70 à 150
14	Dommages mineurs aux structures métalliques	80 à 100
15	Fissures dans la robe d'un réservoir métallique	100 à 150
16	Limite inférieure des dégâts graves (la plupart des dégâts sont « facilement » réparables et correspondent à des tuiles projetées, des vitres cassés, des panneaux tordus, ceci étant les premières fissures dans les murs apparaissent,...)	140
17	Effondrement partiel de murs de 20cm d'épaisseur (INRS) – limite inférieure des Dommages sérieux aux structures	140 à 150
18	Murs en parpaings ou en béton non armé détruits	150 à 200
19	Lézardes et cassures dans les murs béton ou parpaings non armés de 20 à 30 cm	150 à 250
20	Destruction de 50% des maisons en briques (INRS)	160 à 200
21	Maisons inhabitables, effondrement partiel ou total de la toiture, démolition d'1 ou 2 murs extérieurs, dégâts importants aux murs porteurs intérieurs (INRS)	140 à 280
22	Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations	200
23	Rupture de réservoirs de stockage	200 à 500 / 250
24	Bardage acier des bâtiments arrachés, détruits	200 à 270
25	Rupture des structures métalliques autoporteuses industrielles	200 à 300
26	Fissure dans des réservoirs de stockage d'hydrocarbures vides	200 à 300
27	Déformations légères sur un rack de canalisations	200 à 300

28	Déplacement d'un rack de canalisations, rupture des canalisations	350 à 400
29	Maisons d'habitation détruites	350 à 500
30	Revêtement des bâtiments industriels légers soufflé	300
31	Destruction d'un rack de canalisations,	400 à 550
32	Dégâts sur une colonne de distillation	350 à 800
33	50-75% de la maçonnerie extérieure est détruite ou rendue instable (INRS)	350 à 800
34	Retournement de wagons chargés	500
35	Murs en briques, d'une épaisseur de 20 à 30 cm, détruits	500 /500 à 600
36	Déplacement d'un réservoir de stockage circulaire, rupture des canalisations connectées	500 à 1 000
37	Renversement de wagons chargés, destruction de murs en béton armé	700 à 1 000
38	La structure porteuse d'un réservoir de stockage circulaire a cédé	1 000
39	Poteaux téléphoniques abattus (INRS)	700 à 1700
40	Gros arbres abattus (INRS)	1700 à 3800

Tableau 1 : Dégâts typiques

Pour mémoire, le tableau précédent a été réalisé à partir d'une synthèse des informations reportées dans [Lannoy, 1984], [Clancy, 1972], [INRS, 1994], [BIT, 1993] et diverses analyses d'accident [Lechaudel et al., 1995], [Michaélis et al., 1995].

Ces approches ont été développées dans de nombreux ouvrages. L'arrêté du 29 septembre 2005¹ (dit arrêté PCIG pour Probabilité, Cinétique, Intensité et Gravité) en fait une synthèse en distinguant 4 niveaux de pression et d'effets sur les structures :

¹ 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. JO n° 234 du 7 octobre 2005