



CAPSE
CAPITAL SECURITE ENVIRONNEMENT FRANCE



Evaluation des effets toxiques d'un incendie et des effets de surpression d'une explosion de conteneur

Stockage conteneurisé de batteries Li-ion



Evaluation des effets toxiques d'un incendie de batteries et des effets de surpression d'une explosion de conteneur



Dossier réalisé en partenariat avec le bureau d'étude



Stockage conteneurisé de batteries Li-ion

N° affaire : R1_23102_1

N° document : CAPSEFR_R1_23102_RevC

Chargé d'affaires CAPSE FR : Sandrine FONTIMPE
Tel. +33 (0)6 70 49 00 56
E-mail : sandrine.fontimpe@capse.fr

Responsable(s) client(s) : Catherine DELORME
Tel. (+687) 79 97 19
E-mail : catherine.delorme@capse.nc

Historique des modifications

C	Date	Objet des modifications	LA	SF	CD
B	26/02/2024	Modification des données d'entrée	LA	SF	CD
A	05/02/2024	Création du document	LA	SF	CD
Rev.	Date	Objet des modifications	Red.	Vérif.	App.

SOMMAIRE

1 OBJET DU DOSSIER.....	4
2 STOCKAGE CONTENERISE DE BATTERIES LI-ION.....	5
2.1 DESCRIPTION DU STOCKAGE.....	5
2.2 GAZ DEGAGES EN CAS D'EMBALLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES.....	5
3 METHODOLOGIE	6
3.1 METHODE DE MODELISATION DE LA DISPERSION DE FUMEES TOXIQUES.....	6
3.1.1 <i>Détermination du terme-source</i>	6
3.1.2 <i>Seuils d'effets toxiques des polluants</i>	7
3.2 METHODE DE MODELISATION D'UNE EXPLOSION DE CAPACITE.....	8
3.2.1 <i>Modélisation du phénomène</i>	8
3.2.2 <i>Evaluation des effets</i>	8
4 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEES D'INCENDIE ET DES EFFETS DE SURPRESSION EN CAS D'EXPLOSION DE CONTENEUR	9
4.1 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEES	9
4.1.1 <i>Description du scénario et hypothèses retenues</i>	9
4.1.2 <i>Résultats</i>	10
4.2 EVALUATION DES EFFETS DE SURPRESSION D'UNE EXPLOSION DE CONTENEUR.....	11
4.2.1 <i>Description du scénario et hypothèses retenues</i>	11
4.2.2 <i>Résultats</i>	12
5 CONCLUSION	13

1 OBJET DU DOSSIER

La société CAPSE Nouvelle Calédonie a sollicité CAPSE France afin de l'assister dans la modélisation des effets toxiques suite à un incendie de batteries lithium et de calculer les distances d'effets de surpression suite à une explosion d'un conteneur des batteries dans le cadre d'un complément d'étude de dangers pour l'un de ses clients.

L'objet du présent dossier est donc de répondre à cette demande.

Le présent dossier comprendra :

- ✓ Une description du stockage de batteries
- ✓ L'évaluation des effets toxiques en cas d'incendie de ce stockage de batteries Li-ion
- ✓ L'évaluation des effets de surpression en cas d'explosion du conteneur de stockage de batteries.

2 STOCKAGE CONTENERISE DE BATTERIES LI-ION

2.1 DESCRIPTION DU STOCKAGE

La solution de stockage de batteries Li-ion LFP étudiée est une solution conteneurisée en conteneurs de 20 pieds.

Chaque conteneur se compose de :

- 10 racks de 8 modules de batterie chacun, contrôlés par un Système de management de la batterie (Battery Management System, ou « BMS »), permettant une gestion au plus juste des batteries,
- Un système d'extinction incendie,
- Deux systèmes de climatisation,
- Une armoire DC, accommodant les protections nécessaires.

La solution de stockage se présente comme suit. Deux conteneurs 20 pieds sont assemblés pour former un équivalent 40 pieds. Chaque conteneur présente les caractéristiques de compartimentage suivantes : REI 90 sur les 5 faces (dessus et chaque côté). De plus, chaque conteneur comprend deux compartiments : un compartiment avec les modules, capteurs de température, gaz et détecteurs de fumées ainsi que les BMS module et rack, et l'autre compartiment avec l'armoire des auxiliaires, le système anti-incendie ainsi que le système de refroidissement.



Figure 1 : Illustration d'un double conteneur

Un conteneur est en acier et de dimensions 6,05 m x 2,44 m x 2,59 m.

La masse de batteries stockées à l'intérieur d'un conteneur est de 36 tonnes, soit un total de 72 tonnes pour un double conteneur.

La hauteur de stockage correspond à la hauteur d'un conteneur soit 2,59 m.

2.2 GAZ DEGAGES EN CAS D'EMBALLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES

Les batteries Li-ion qui font l'objet de ce dossier peuvent dégager les gaz suivants en cas d'emballage thermique, phénomène qui peut être occasionné par l'incendie des batteries Li-ion.

Tableau 1 : Composition des gaz dégagés lors de l'emballage thermique de batteries Li-ion (LFP)¹

Gaz	Composition	Potentiel de danger
CO ₂	26 %	Toxique
CO	11,6 %	Toxique

¹ Intertek. 2022. Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems - Rapport de tests fourni par le commanditaire

H₂	44,38 %	Inflammable
Hydrocarbures	18,02 %	Inflammable

Les effets toxiques engendrés par un incendie de batteries Li-ion et les effets de surpression engendrés en cas d'explosion des gaz inflammables dégagés par les batteries lors de leur emballage thermique sont étudiés selon les méthodologies présentées ci-dessous.

3 METHODOLOGIE

3.1 METHODE DE MODELISATION DE LA DISPERSION DE FUMEES TOXIQUES

La modélisation s'effectue en 3 étapes :

- ✓ Détermination du terme-source ;
- ✓ Détermination des seuils d'effets toxiques des fumées ;
- ✓ Calcul avec le logiciel PHAST des distances d'effets aux seuils déterminés précédemment.

La présente méthodologie s'appuie sur le rapport d'étude de l'INERIS : Ω16 - Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme) susceptibles d'être émises par un incendie.

3.1.1 Détermination du terme-source

Le terme-source est caractérisé par la connaissance des paramètres suivants relatifs aux fumées :

- ✓ Débit ;
- ✓ Durée de l'incendie ;
- ✓ Hauteur d'émission ;
- ✓ Température.

La méthodologie de détermination des paramètres débit et température des fumées est détaillée ci-après.

3.1.1.1 Débit massique des fumées

Le débit des fumées est calculé d'après l'équation suivante :

$$D_{fumées} = 0,071 \cdot Q_c^{\frac{1}{3}} \cdot (z_1 - z_0)^{\frac{5}{3}} \cdot (1 + 0,026 \cdot Q_c^{\frac{2}{3}} \cdot (z_1 - z_0)^{-\frac{5}{3}})$$

Avec

- Q_c : puissance convectée (kW) définie telle que $Q_c = \frac{2}{3} Q_{foyer}$
- Q_{foyer} : puissance thermique globale dégagée par le foyer (kW) : $Q_{foyer} = \dot{\omega} \cdot S \cdot \Delta \dot{H}_c$.
- $\dot{\omega}$: vitesse de combustion surfacique (donnée de la littérature, exprimée en kg/m²/s)
- S : surface en feu (m²)
- $\Delta \dot{H}_c$: chaleur de combustion du produit (donnée de la littérature, exprimée en kJ/kg)
- z_0 : origine virtuelle du sinistre définie telle que : $z_0 = -1,02 \cdot D_{eq} + 0,083 \cdot Q_{foyer}^{2/5}$
- D_{eq} : diamètre équivalent de la surface en feu défini tel que $D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$
- z_1 : hauteur limite pour laquelle le calcul du débit des fumées peut être utilisé : $z_1 = z_0 + 0,166 \cdot Q_c^{2/5}$

3.1.1.2 Débit de chaque composant des fumées

Une base de donnée sur les facteurs d'émission mesurés lors de campagnes expérimentales menées par l'INERIS synthétise les facteurs d'émission (en g/kg perdus) pour certains produits ([Omega 16 - Recensement des substances toxiques \(ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme\) susceptibles d'être émises par un incendie | Ineris](#)).

Pour obtenir le débit de chaque polluant, on calcule le produit des facteurs d'émission avec le débit de combustion (lui-même défini par le produit entre la vitesse de combustion surfacique et la surface en feu).

3.1.1.3 Concentration des polluants dans les fumées

La concentration de chaque polluant dans les fumées s'obtient avec :

$$C_{polluant} = \frac{D_{polluant}}{D_{fumées}}$$

Où

$D_{polluant}$: débit du polluant (kg/s)

$D_{fumées}$: débit massique des fumées (kg/s)

3.1.1.4 Evaluation de la température des fumées

Le guide Omega 16 de l'INERIS définit la température moyenne dans le panache de fumée telle que :

$$T_{moy} = T_{amb} + \frac{Q_c}{D_{fumées} \cdot C_p}$$

C_p : chaleur spécifique de l'air, calculée à température ambiante

Heskestad a montré qu'à la hauteur d'émission des fumées, l'écart moyen entre la température des fumées et la température de l'air ambiant est de l'ordre de 250 K ainsi C_p s'obtient telle que :

$$C_p = \frac{Q_c}{\Delta T \cdot D_{fumées}} = \frac{Q_c}{250 \cdot D_{fumées}}$$

3.1.1.5 Hauteur d'émission des fumées

Dans le cas présent, la hauteur d'émission des fumées est prise à la hauteur de stockage, soit la hauteur d'un conteneur de 20'.

3.1.2 Seuils d'effets toxiques des polluants

Les seuils de toxicité des polluants (valeurs de SEI, SEL et SELS à 60 minutes) sont issus des fiches de toxicité aiguë qui sont présentes sur le portail des substances chimiques de l'INERIS (<https://substances.ineris.fr/fr/>).

Tableau 2 : Seuils de toxicité des polluants

Durée d'exposition	Polluants	SEI polluant (ppm)	SEL polluant (ppm)	SELS polluant (ppm)
60 minutes	CO	800	3 200	3 200 ⁽³⁾
	CO ₂	40 000 ⁽¹⁾	40 000	40 000
	COVt	800	4 000	4 000
	HAP	250	250	250
	HBr	149	1 343	1 677
	HCl	40	240	379
	HCN	7,1 ⁽²⁾	41	63
	HF	100	189	283
	NO ₂	40	70	73

⁽¹⁾ L'INERIS ne présente pas de valeurs de seuils pour le CO₂ pour une durée d'exposition à 60 minutes. La valeur IDLH pour une durée d'exposition à 30 minutes est conservée.

⁽²⁾ Le portail des substances chimiques de l'INERIS ne présente pas de SEI du fait de l'absence de données toxicologiques pertinentes. Dans ces conditions, en accord avec la circulaire du 10 mai 2010, il est possible d'utiliser les seuils américains, les seuils AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) définis par l'US EPA (AEGL-2 pour le SEI, AEGL-3 pour le SEL). Pour HCN, l'AEGL-2 est de 7,1 ppm pour une durée d'exposition de 60 minutes. Cette valeur est donc retenue.

⁽³⁾ Le seuil des effets létaux significatifs n'étant pas connu pour le CO, de façon conservative le SEL a été retenu.

La loi d'additivité des seuils définit :

$$\frac{1}{\text{Seuil}_{\text{équivalent}}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\text{Concentration du polluant } P_i}{\text{Seuil du polluant } P_i}$$

3.2 MÉTHODE DE MODELISATION D'UNE EXPLOSION DE CAPACITE

3.2.1 Modélisation du phénomène

L'explosion d'une capacité est provoquée par la combustion rapide d'un mélange gazeux inflammable. L'expansion des produits de combustion est à l'origine d'une montée en pression dans la capacité.

Au-delà d'une limite de pression (pression de rupture), l'élément de résistance le plus faible de la capacité va céder. L'énergie accumulée va se libérer par la détente adiabatique du gaz qui va générer des ondes de pression à l'extérieur.

Ces surpressions peuvent engendrer des lésions graves sur les organes et peuvent être à l'origine des dégradations sur les structures.

3.2.2 Evaluation des effets

L'approche utilisée est celle de Baker fondée sur le modèle des gaz parfaits, elle permet notamment de déterminer les niveaux de surpressions à partir de l'énergie contenue dans la capacité au moment de la rupture.

Des coefficients correctifs permettent de tenir compte :

- ✓ de la forme du réservoir, la propagation est supposée isotrope.
- ✓ des surpressions en champ proche (surpression supérieure à 140 mbar) du fait de l'utilisation de la méthode d'équivalence TNT dans l'abaque de Baker en champ proche.

La non prise en compte de ces facteurs correctifs, ce qui est le cas dans la suite de l'étude, conduit à surévaluer les zones de dangers.

Le modèle permet alors de calculer l'énergie d'explosion à l'aide de la formule de Brode pour ensuite pouvoir déterminer grâce à l'abaque de Baker, la surpression créée par l'explosion.

La formule de Brode est la suivante :

$$E_{av} = \frac{(p_1 - p_a) \cdot V_g}{(\gamma - 1)}$$

Avec :

E_{av} : Energie libérée lors de l'explosion (J)

p_1 : Pression absolue d'éclatement (Pa)

p_a : Pression atmosphérique (Pa)

γ : Rapport des chaleurs spécifiques

V_g : Volume occupé par le gaz (volume du réservoir) (m^3)

4 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEES D'INCENDIE ET DES EFFETS DE SURPRESSION EN CAS D'EXPLOSION DE CONTENEUR

4.1 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEES

4.1.1 Description du scénario et hypothèses retenues

Le scénario étudié est un incendie d'un double conteneur de stockage de batteries Li-ion.

Les hypothèses retenues et les données d'entrée nécessaires pour la modélisation des distances d'effet toxique dû aux fumées en cas d'incendie du stockage de batteries sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 3 : Données et hypothèses retenues pour la modélisation des effets toxiques des fumées

Données	Valeur	Commentaires
Composition du conteneur	72 tonnes de batteries	Les conteneurs étant incombustibles, seules les batteries sont considérées.
Enthalpie de combustion	25,72 MJ/kg	Le conteneur est en acier et donc incombustible, seule l'enthalpie des batteries est utilisée. Sources : Calculée à partir des essais INERIS. DRA-16-148820-00064A. Comparaison des effets thermiques et toxiques de l'incendie des batteries et d'autres marchandises lors de leur transport par camion.
Vitesse de combustion	128 g/m ² /s	Le conteneur est en acier et donc incombustible, seule la vitesse de combustion des batteries est utilisée. La moyenne des 2 valeurs maximales obtenues par l'INERIS lors de leurs essais est retenue. Source : Calculée à partir des essais INERIS
Surface en feu	29,5 m ²	Surface de 2 conteneurs de 20' côté à côté. $S = 2 \times 6,05 \times 2,44 \text{ m}$
Diamètre équivalent des flammes	6,13 m	$D = \sqrt{\frac{4.S}{\pi}}$ Source : Omega 16
Origine virtuelle du sinistre (z₀)	1,95 m	$z_0 = -1,02.D_{eq} + 0,083.Q_{foyer}^{2/5}$ Source : Omega 16
Hauteur d'émission des fumées	2,6 m	Dans le cas présent, la hauteur d'émission est prise à la hauteur de stockage, soit la hauteur d'un conteneur de 20'.
Débit massique des fumées	350 kg/s	$D_{fumées} = 0,071.Q_c^{\frac{1}{3}}.(z_1 - z_0)^{\frac{5}{3}}.(1 + 0,026.Q_c^{\frac{2}{3}}.(z_1 - z_0)^{-\frac{5}{3}})$ Source : Omega 16
Puissance thermique du foyer	97 198 kW	$Q_t = S.\dot{m}.\Delta H_c.$ Source : Omega 16

Puissance convectée (panache)	64 798 kW	$Q_c = \frac{2}{3} Q_t$ Source : Omega 16																						
Facteurs d'émission par substance	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Facteurs d'émission (g/kg perdus)</th> <th>Batterie Li-ion (NMC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CO</td><td>14</td></tr> <tr><td>CO₂</td><td>977</td></tr> <tr><td>COVt</td><td>8,4</td></tr> <tr><td>HAP</td><td>0,045</td></tr> <tr><td>HBr</td><td>0</td></tr> <tr><td>HCl</td><td>0</td></tr> <tr><td>HCN</td><td>0</td></tr> <tr><td>HF</td><td>7</td></tr> <tr><td>NO_x</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>SO₂</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Facteurs d'émission (g/kg perdus)	Batterie Li-ion (NMC)	CO	14	CO ₂	977	COVt	8,4	HAP	0,045	HBr	0	HCl	0	HCN	0	HF	7	NO _x	0,9	SO ₂	0	<p>Source : Omega 16 – Recensement des substances toxiques ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme susceptibles d'être émises par un incendie</p> <p>Les facteurs d'émission normalisés fournis par l'INERIS pour des batteries NMC sont utilisés (pénalisants sur les facteurs d'émission des batteries de technologie LFP).</p> <p>Pour le volet toxicité accidentelle, la proportion de COV et de HAP dans les fumées est négligeable au regard du ratio proportion/seuil de toxicité. Ainsi, les calculs de dispersion, sont faits avec les substances classiques (HF, SO₂, NO₂, HCN, HCl, CO, CO₂). Les autres composés doivent en revanche être considérés en cas de sinistre pour évaluer l'impact environnemental potentiel.</p>
Facteurs d'émission (g/kg perdus)	Batterie Li-ion (NMC)																							
CO	14																							
CO ₂	977																							
COVt	8,4																							
HAP	0,045																							
HBr	0																							
HCl	0																							
HCN	0																							
HF	7																							
NO _x	0,9																							
SO ₂	0																							
Débits de polluants	CO : 5,29 x 10 ⁻² kg/s CO ₂ : 3,69 kg/s HCl : 0,00 kg/s HCN : 0,00 kg/s HF : 2,65 x 10 ⁻² kg/s NO ₂ : 3,40 x 10 ⁻³ kg/s	Correspond au produit entre le débit de combustion et les facteurs d'émission des polluants.																						
Concentration en polluant	CO : 1,51 x 10 ⁻⁴ kg/kg CO ₂ : 1,05 x 10 ⁻² kg/kg HCl : 0 kg/kg HCN : 0 kg/kg HF : 7,55 x 10 ⁻⁵ kg/kg NO ₂ : 9,71 x 10 ⁻⁶ kg/kg	Rapport entre le débit en polluant et le débit des fumées																						
Seuil de toxicité des fumées	SEI : 689 554 ppm SEL : 1 177 892 ppm SELS : 1 407 349 ppm	Toxicité d'un mélange : $\frac{1}{Seuil_{équivalent}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Concentration\ du\ polluant\ P_i}{Seuil\ du\ polluant\ P_i}$																						
Température des fumées (°C)	270	Source : Heskstad (Omega 16)																						

4.1.2 Résultats

La dispersion atmosphérique des fumées a été modélisée à l'aide du logiciel PHAST (version 8.7) en prenant en compte les conditions météorologiques suivantes : A3, B3, B5, C5, C10, D5, D10, E3 et F3 (il s'agit des conditions atmosphériques retenues dans la circulaire du 10 mai 2010).

Le graphique ci-dessous illustre les résultats des distances atteintes pour le SEI suite à la modélisation via PHAST.

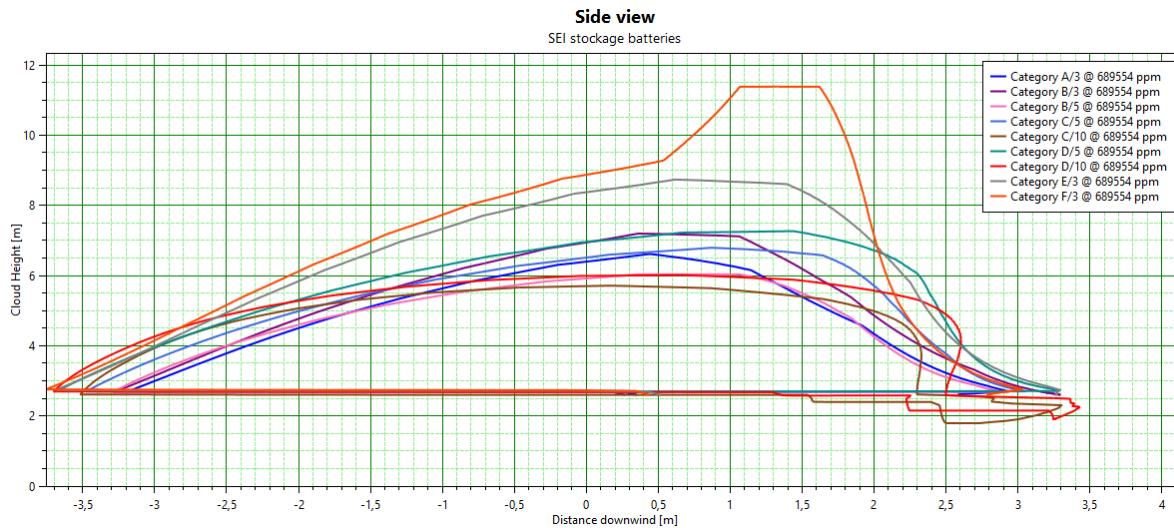


Figure 2 : Graphique des distances au seuil des effets irréversibles des fumées toxiques produites par un incendie de stockage de batteries Li-ion

Les distances calculées ci-dessus représentent les distances à partir du centre de la surface en feu assimilée à un disque de rayon équivalent. Les résultats de la modélisation présentés montrent que les distances atteintes par les effets toxiques au seuil des effets irréversibles dépassent très légèrement de la zone de stockage (maximum 0,8 mètres en dehors du conteneur).

A hauteur d'homme (1,8 m), quelles que soient les conditions météorologiques, le seuil des effets irréversibles équivalents des fumées n'est pas atteint en dehors de la surface en feu.

N.B. : La concentration d'intérêt étudiée par le logiciel PHAST ne peut être supérieure à 1 000 000 ppm. Les dispersions atmosphériques du nuage毒气云 aux seuils d'effets létaux (SEL et SELS) n'ont donc pas pu être modélisées.

4.2 EVALUATION DES EFFETS DE SURPRESSION D'UNE EXPLOSION DE CONTENEUR

4.2.1 Description du scénario et hypothèses retenues

Le scénario étudié est l'explosion du conteneur de stockage suite à l'inflammation des gaz inflammables dégagés par l'emballage thermique des batteries Li-ion.

Les hypothèses retenues et les données d'entrée nécessaires pour la modélisation des distances d'effet de surpression dû à l'explosion d'un conteneur de stockage en cas d'emballage thermique des batteries sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 4 : Données d'entrée nécessaires à la modélisation d'une explosion de conteneur de stockage de batteries Li-ion

Paramètres	Valeurs	Source
Résistance du conteneur	170 mbar soit une pression d'éclatement égale à 1,17 bara	Robert Zalosh and al. <i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries - Lithium-ion energy storage battery explosion incidents</i> ²
Volume du conteneur	33 m ³	Dimensions du conteneur

² Le rapport d'étude de l'INERIS DRA-14-141835-08814A - Guide de détermination des effets dominos sur l'enveloppe des engins de transport indique une pression de rupture des containers maritimes à 20 mbar. Une explosion d'une unité de batterie ayant eu lieu en Arizona en 2019, le NFPA a mené des essais d'explosion avec des structures de taille et de construction similaires (y compris des conteneurs ISO), estimant une pression de rupture interne entre 0,10 et 0,17 bar. Cette dernière valeur est retenue dans une hypothèse pénalisante.

Paramètres	Valeurs	Source
Energie libérée lors de l'explosion	2,10 MJ	Voir 3.2
Rapport des chaleurs spécifiques	1,314	Rapport du GTDLI - Modélisation des effets de surpression dus à une explosion de bac atmosphérique. Valeur majorant les résultats par rapport à la chaleur spécifique de l'H ₂ (1,4098)

4.2.2 Résultats

Les résultats des modélisations des effets de surpression sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 5 : Distances atteintes aux seuils des effets de surpression de l'explosion de gaz dans un container de stockage

Distances d'effets de surpression			
Bris de vitre (20 mbar)	SEI (50 mbar)	SEL (140 mbar)	SELS (200 mbar)
27,2 m	13,6 m	5,8 m	4,4 m

5 CONCLUSION

L'étude des effets toxiques associés à un incendie de deux conteneurs de 20' contenant un total de 72 tonnes de batteries Li-ion a démontré que quelle que soit les conditions météorologiques, les distances au seuil des effets irréversibles (et donc des effets létaux) atteintes par les fumées toxiques ne dépassent que légèrement de la surface en feu (0,8 mètres en dehors du conteneur).

A hauteur d'homme et en dehors de la surface en feu, le seuil des effets irréversibles équivalents des fumées n'est pas atteint, il en est donc de même pour le seuil des effets létaux et le seuil des effets létaux significatifs.

En cas d'explosion du conteneur de stockage suite au dégagement de gaz inflammables occasionné lors de l'emballage thermique des batteries Li-ion, les effets peuvent atteindre jusqu'à 27,2 mètres pour le seuil des bris de vitre (20 mbar) et jusqu'à respectivement 13,6 m et 5,8 m pour le seuil des effets irréversibles (50 mbar) et le seuil des effets létaux (140 mbar). Le seuil des effets létaux significatifs (200 mbar) est atteint dans un rayon de 4,4 m du conteneur.