MINISTÈRE
DES ARMÉES
Liberté
Égalité
Fraternité

PROJET EXCEL
CENTRE D'EXPERTISE TECHNIQUE DU SEO (CETSEO)

Modélisation de phénomènes dangereux liés aux batteries



Octobre 2026

SERVICE DE L'ÉNERGIE OPÉRATIONNELLE

CENTRE DE SOUTIEN TECHNIQUE ET ADMINISTRATIF

EDITION

Date	Version	Modification	Principales modifications	
			N° page	Modification
Octobre 2026	1	Document initial	/	

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 5

2. PRÉSENTATION DU SITE 6

2.1. Localisation 6
2.2. Installations du CETSEO 8

3. DESCRIPTION DU PROJET 10

3.1. Localisation du projet 10
3.2. Local de stockage de batteries au lithium 11

4. DANGERS LIES AUX BATTERIE AU LITHIUM 12

5. MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX 13

5.1. Choix des phénomènes dangereux à modéliser 13
5.2. Seuil des effets 14
5.3. Méthodes et outils de modélisation 16
5.3.1. Feu de nappe de liquides inflammables ou combustibles ou feu de solide combustible 16
5.3.2. Explosion de gaz dans un local ou dans une structure 18
5.4. Modélisation des phénomènes dangereux 21
5.4.1. PhD1 : Incendie des batteries de lithium-ion 21
5.4.2. PhD2 : Explosion confinée dans le local batterie 24

ANNEXES

Annexe 1 : Cartographies des distances d'effets des phénomènes dangereux

TABLEAUX

Tableau 1 : Seuils réglementaires des effets thermiques.....14
Tableau 2 : Seuils réglementaires des effets de surpression.....15
Tableau 3 : Comparaison des distances d'effets pour des feux de liquides et des feux de solides.....17
Tableau 4 : Hypothèses - Incendie de batteries lithium 22
Tableau 5 : Résultats - Distances d'effets de l'incendie des batteries au lithium.....22
Tableau 6 : Hypothèses – Explosion 24
Tableau 7 : Résultats - Distances d'effets de l'explosion 24

FIGURES

Figure 1 : Environnement proche du CETSEO de Marseille 7
Figure 2 : Localisation des installations du site..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 3 : Localisation globale de la zone du projet.....10
Figure 4 : Localisation de la zone du projet au sein du bâtiment 0006.....10

1. INTRODUCTION

Le Centre d'Expertise Technique du Service de l'Énergie Opérationnelle (CETSEO), subordonné à la Direction du Service de l'Énergie Opérationnelle (DSEO), est l'organisme d'expertise des produits pétroliers et énergies alternatives, des matériels et matériaux connexes distribués aux forces ou utilisés par le Service de l'Énergie Opérationnelle[1] (SEO).

Le ministère des Armées prévoit la création, sur son site de Marseille, d'une zone technique sécurisée dédiée à la réalisation d'essais sur des batteries au lithium.
Cette zone sera implantée au sein de l'atelier 004 du bâtiment existant 0006. L'atelier fera l'objet de travaux de réhabilitation et d'aménagement afin de répondre aux exigences constructives et de sécurité associées à cette activité.

Le présent rapport a pour objectif d'évaluer les conséquences de scénarios accidentels en lien avec cette nouvelle activité.
Le scénario accidentel retenu est un emballement thermique de batteries au lithium au sein du local. Ce phénomène peut entraîner un dégagement de gaz toxiques et de gaz inflammables.

L'étude portera ainsi sur la modélisation :

- d'un scénario d'incendie suite à l'emballement thermique, afin d'évaluer les effets thermiques associés ;
- d'un scénario d'explosion du local, afin d'évaluer les effets de surpression associés à l'inflammation des gaz dégagés suite à un emballement thermique.

[1] *Le Service de l'Énergie Opérationnelle (SEO) est un service interarmées relevant du Chef d'État-major des Armées. Son rôle est d'assurer en tout lieu et en tout temps l'approvisionnement, le stockage et la distribution des produits pétroliers et des énergies alternatives nécessaires aux armées et à tout autre service ou organisme relevant du ministre des Armées.*

2. PRÉSENTATION DU SITE

2.1. Localisation

Le Centre d'Expertise Technique du Service de l'Énergie Opérationnelle (CETSEO) est implanté dans le département des Bouches-du-Rhône (13) dans le 14ème arrondissement de Marseille.
Il se situe dans un secteur urbain dense.

L'environnement du CETSEO est caractérisé :

- au Nord : par l'impasse Rosette, des habitations, le Secrétariat général administratif de police et la gare de Sainte-Marthe;
- à l'Ouest : par le chemin de Sainte-Marthe, le Secrétariat général pour l'administration du Ministère de l'intérieur et le camp militaire de Sainte-Marthe ;
- à l'Est : par une voie ferrée, un collège, une piscine et des écoles primaires ;
- au Sud : par des habitations.

L'établissement recevant du public le plus proche est le collège Pythéas, situé à environ 20 m à l'est du CETSEO, de l'autre côté de la voie ferrée.
L'activité industrielle « sensible » la plus proche est un supermarché Carrefour soumis à autorisation au titre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) à 720 m au Sud-Est du CETSEO.

La carte suivante localise cet environnement :

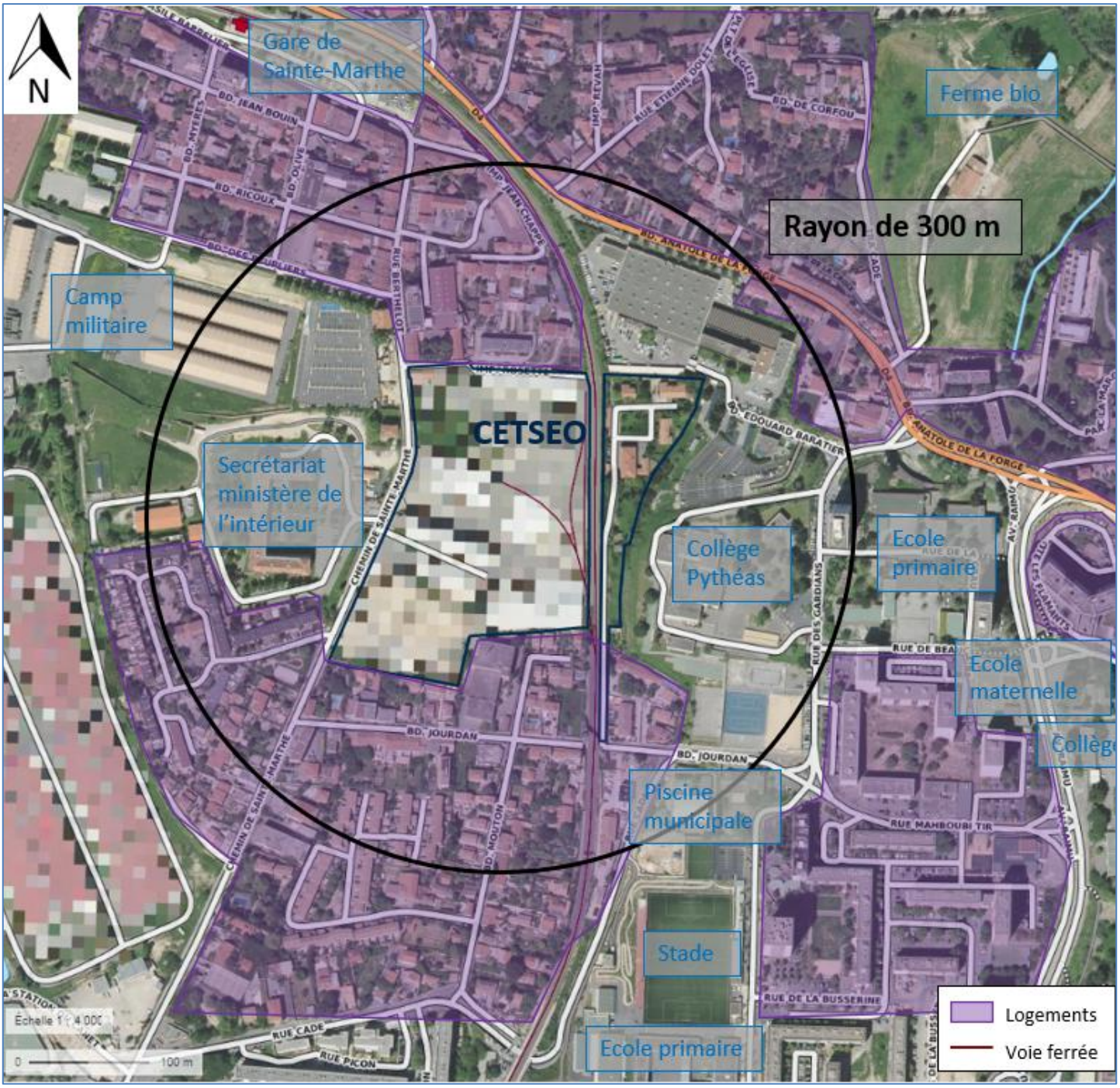


Figure 1 : Environnement proche du CETSEO de Marseille

Source : Géoportail

2.2. Installations du CETSEO

Les principales installations du CETSEO sont listées ci-dessous et détaillées ci-après :

- les installations pétrolières spécialisées :
  - 8 réservoirs à axe horizontal enterrés :
    - 2 réservoirs à axe horizontal enterrés de 150 m³ (C6 et C7) ;
    - 5 réservoirs à axe horizontal enterrés de 50 m³ (C1 à C5) ;
    - 1 réservoir à axe horizontal enterré de 10,6 m³ (C8) ;
  - 1 pomperie ;
  - 1 installation de chargement ou de déchargement des véhicules-citernes comportant 1 aire ;
  - 1 capacité de confinement de 40 m^3 ;
  - 1 unité de filtration dans le bâtiment M1 ;
  - Des GRV ;
- les installations non pétrolières :
  - 1 laboratoire d'analyse (totalité du bâtiment M3) ;
  - 4 bancs d'essai moteur (bâtiment M5) ;
  - 2 zones de stockage d'échantillons de produits, des bureaux, un local déchets et une chaufferie au fioul (bâtiment M1) ;
  - 1 stockage tampon de déchets (bâtiment M2) ;
  - 1 stockage de cuvettes de rétention en support textile revêtu (bâtiment M4) ;
  - des ateliers divers : fontaine de dégraissage, atelier de ferronnerie/soudure (bâtiment M5) ;
  - des bâtiments désaffectés, qui ne sont plus utilisés actuellement (ancien poste de garde, local pompier, station de distribution, aire de lavage et atelier de maintenance des véhicules) ; *À noter que certains bâtiments désaffectés ont été démolis ou réhabilités*
  - 1 groupe électrogène (GE) associé à un réservoir aérien de 3 000 L de gasoil sur rétention ;
  - 1 tour aéroréfrigérante (TAR).

Il est à noter qu'en partie Est du CETSEO se trouve des logements appartenant au ministère des armées. Cette zone est séparée du CETSEO par une voie ferrée reliant notamment Marseille à Aix-en-Provence. Un tunnel permet de relier les deux zones.

3. DESCRIPTION DU PROJET

3.1. Localisation du projet

Figure 2 : Localisation globale de la zone du projet

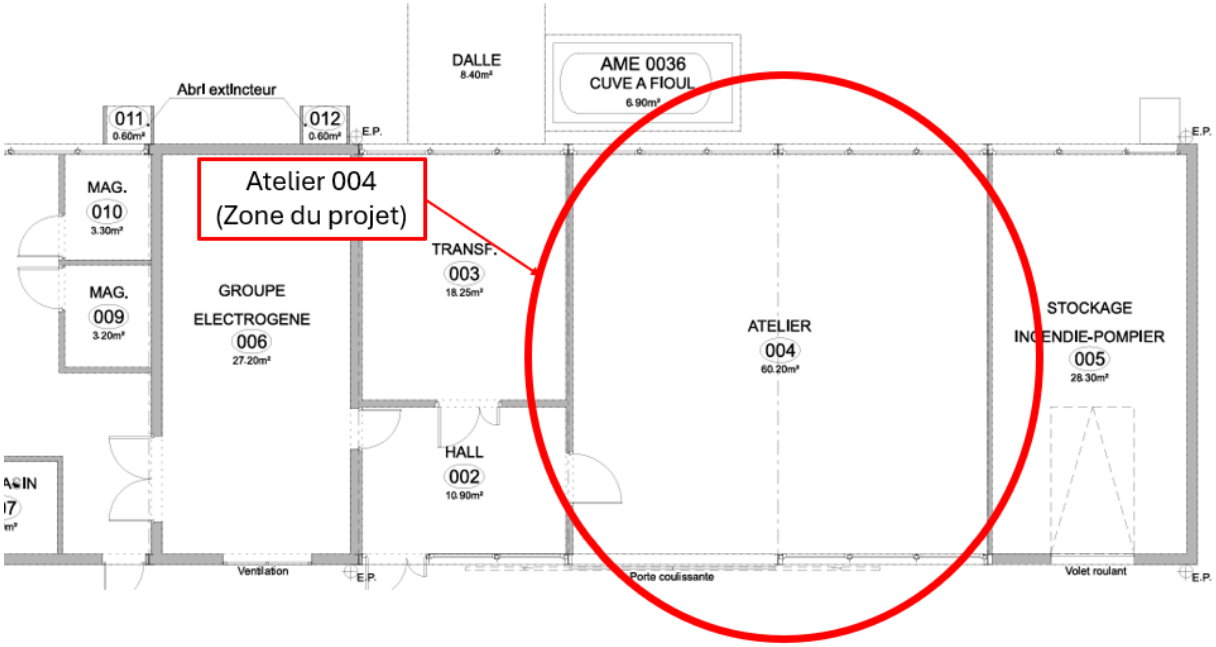


Figure 3 : Localisation de la zone du projet au sein du bâtiment 0006

3.2. Local de stockage de batteries au lithium

Le ministère des Armées prévoit la création, sur son site de Marseille, d'une zone technique sécurisée dédiée à la réalisation d'essais sur des batteries au lithium.

Cette zone sera implantée au sein de l'atelier 004 du bâtiment existant 0006. L'atelier fera l'objet de travaux de réhabilitation et d'aménagement afin de répondre aux exigences constructives et de sécurité associées à cette activité. Elle intégrera notamment les équipements suivants :

- Bancs d'essais EIA ;
- Cellule climatique LENPURE ;
- Armoires / étuves DENIOS.

Ci-dessous les caractéristiques actuelles et projetées de l'atelier du local de stockage des batteries :

Caractéristiques constructives actuelles de l'atelier :

- Dimension de l'atelier 004 (8.0m x 8.0m x 3.73m faux plafond)
- Disposition constructive du local :
  - Ossature métallique IPN
  - Murs extérieurs Sud: bardage de parpaings de 20 cm enduits extérieurs d'un revêtement semi épais de classe D3 en 2 couches
  - Murs intérieurs Est et Ouest : cloisons lourdes en maçonnerie brique enduites en deux faces
  - Toiture : bac acier simple peau fixée sur charpente métallique
  - Présence d'une porte sectionnelle de 3.90 x 2.70m et une porte 0.9 x 2.20

Caractéristiques constructives projetées du local de stockage des batteries au lithium :

- Dimension du local (7.4m x 7.6m x 3.73m faux plafond)
- Disposition constructive du futur local :
  - Ossature métallique IPN
  - Murs extérieurs : bardage de parpaings de 20 cm enduits extérieurs d'un revêtement semi épais de classe D3 en 2 couches avec un voile de 30cm sur mur Sud en intérieur
  - Murs intérieurs : cloisons lourdes en maçonnerie agglo enduites en deux faces et un voile de 30cm sur mur Est en intérieur, et un voile de 30cm sur cloison Ouest en remplacement de la cloison d'origine en intérieur
  - Toiture : bac acier simple peau fixée sur charpente métallique
  - Remplacement du faux plafond par plafond coupe-feu 2h en plaque de plâtre
  - Création au Nord de deux évents de surpression
  - Présence d'une porte sectionnelle de 3.90 x 2.70m et d'une porte de service sur mur Ouest coupe-feu 1h00

Le futur local de stockage des batteries accueillera un maximum de 15 batteries lithium avec une puissance cumulée < 25kWh.

4. DANGERS LIES AUX BATTERIE AU LITHIUM

Dans le cadre du présent paragraphe, l'objectif est d'identifier les dangers associés aux produits combustibles et inflammables présents dans les batteries lithium-ion (Li-ion).

Une batterie lithium est composée de modules eux-mêmes composés de cellules. L'assemblage de ces modules en série / parallèle permet de définir les caractéristiques finales de la batterie (capacité, tension, puissance). Les cellules au lithium sont encapsulées hermétiquement, c'est-à-dire fermées de manière étanche aux gaz, de façon à ce qu'aucun composant ne puisse s'échapper durant le fonctionnement régulier normal. Les cellules contiennent les composants dangereux. En fonctionnement normal, les cellules n'étant pas accessibles, les composants dangereux ne sont donc pas accessibles non plus.

Les batteries Li-ion combinent ainsi la mise en œuvre d'électrodes fortement oxydantes et réductrices en contact avec un électrolyte organique inflammable. Les électrodes, notamment l'électrode positive, peuvent devenir instables à des températures élevées (> 200°C). De plus, les solvants composant l'électrolyte possèdent des pressions de vapeurs relativement importantes à des températures modérées.

Des conditions inhabituelles ou abusives d'utilisation, telles qu'une surcharge, un court-circuit, un choc, un défaut interne ou l'exposition à une source de chaleur extérieure, peuvent provoquer une augmentation rapide et incontrôlée de la température de la cellule. Ce phénomène, appelé emballement thermique, peut conduire à l'inflammation de la batterie, à la propagation du phénomène aux batteries voisines ainsi qu'au dégagement de fumées et de gaz toxiques et inflammables.

L'emballement thermique peut également entraîner un risque d'explosion. Les gaz inflammables libérés par la batterie peuvent s'accumuler dans le local. En présence d'une source d'ignition, ces gaz peuvent s'enflammer et provoquer une explosion générant des effets de surpression, notamment dans un milieu fermé ou semi-confiné.

Le principal danger alors identifié pour le stockage ou la charge de batteries au lithium est le danger d'incendie, avec un phénomène d'emballement thermique. Les principaux phénomènes à distinguer sont :

- L'incendie initié au niveau d'une batterie. Cela peut se produire en cours de charge de la batterie (par exemple surcharge ou court-circuit) ou sur des batteries endommagées (agression externe) ;
- La batterie prise dans un incendie d'origine externe. Dans ce cas, les batteries sont un facteur d'aggravation, en raison des effets d'emballement thermique et de la complexité des conditions d'intervention pour maîtriser l'incendie.
- L'explosion liée à l'accumulation de gaz inflammables dans le local, générant des effets de surpression.

5. MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX

5.1. Choix des phénomènes dangereux à modéliser

Le scénario accidentel redouté sur des zones de stockage ou d'utilisation de batterie lithium ion est un emballement thermique. Comme vu précédemment, ce phénomène peut entraîner un dégagement de gaz toxiques et de gaz inflammables.

Ainsi, il sera modélisé 2 phénomènes dangereux :

- PhD1 : Incendie des batteries de lithium-ion ;
- PhD2 : Explosion confinée dans le local batterie.

Ces 2 phénomènes dangereux seront modélisés dans le cadre de la configuration future mais en ne prenant pas en compte les prescriptions constructives de l'étude de faisabilité de ORIS Ingénierie de juin 2026. Ces préconisations étaient :

- la mise en place de murs pyrotechniques anti-souffle et coupe-feu 2h ;
- la mise en place d'une toiture en bac acier simple peau avec le remplacement du faux plafond par un plafond coupe-feu 2h en plaque de plâtre.

Ainsi, la configuration du local retenue sera celle du local futur mais en prenant en compte :

- des murs en parpaing classiques ;
- une toiture en bac acier simple peau (comme projetée) mais sans plafond coupe-feu 2h.

5.2. Seuil des effets

Les seuils retenus dans le cadre de la modélisation des phénomènes dangereux sont définis par l'arrêté ministériel modifié 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 des dangers des installations classées soumises à autorisation* » :

Tableau 1 : Seuils réglementaires des effets thermiques

Effets prévisibles sur l'homme (1)	Effets prévisibles sur les structures
3 kW/m² ou 600 (kW/m²)$^{4/3}$.s Seuil des effets irréversibles (**SEI**) correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine	/
5 kW/m² ou 1 000 (kW/m²)$^{4/3}$.s Seuil des premiers effets létaux (**SEL**) correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine	**5 kW/m²** Seuil des destructions de vitres significatives
8 kW/m² ou 1 800 (kW/m²)$^{4/3}$.s Seuil des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à la zone de dangers très graves pour la vie humaine	**8 kW/m²** Seuil des **effets dominos** et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures
/	**16 kW/m²** Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
/	**20 kW/m²** Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton

(1) Pour les phénomènes d'une durée inférieure à 2 minutes (ex : jet enflammé d'une durée inférieure à 2 minutes) et les phénomènes transitoires (ex : BLEVE ou boil-over), les seuils pris en compte sont ceux correspondant à des doses thermiques reçues en [(kW/m²)$^{4/3}$].s.

Tableau 2 : Seuils réglementaires des effets de surpression

Effets prévisibles sur l'homme	Effets prévisibles sur les structures	Surpression
Seuil des effets correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme	Seuil des destructions significatives de vitres	20 mbar
Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine (**SEI**)	Seuil des dégâts légers sur les structures	50 mbar
Seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine (**SEL**)	Seuil des dégâts graves sur les structures	140 mbar
Seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine (**SELS**)	Seuil des effets dominos	200 mbar
/	Seuil des dégâts très graves sur les structures	300 mbar

5.3. Méthodes et outils de modélisation

5.3.1. Feu de nappe de liquides inflammables ou combustibles ou feu de solide combustible

La **modélisation des flux thermiques** rayonnés par un feu de combustibles solides ou de liquides inflammables ou combustibles est réalisée par l'utilisation **de l'outil de calcul « IFNAP », développé par Antea Group (Incendie Feu de Nappe)**.

IFNAP permet l'étude des combustibles liquides mais aussi des combustibles solides susceptibles de se liquéfier sous l'effet de la chaleur (plastiques, bitumes…) et les matières solides combustibles qui peuvent induire un feu de surface similaire à celui des feux de liquides.

Le modèle développé par Antea Group repose sur la considération d'une flamme solide à une zone. La flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple dont les surfaces rayonnent uniformément. De fait il est supposé une température de flamme et une composition homogène sur toute la hauteur de la flamme.

Le flux rayonné en un point extérieur à la flamme est donné par la formule générique :

$$\phi_R = \phi_0 . F . \tau_{air}$$

Avec :

ϕ_R : Flux unitaire reçu par la cible (kW/m²)

ϕ_0 : Flux radiatif initial de la flamme ou pouvoir émissif de la flamme (kW/m²)

F : Facteur de forme fonction de la géométrie du feu et de l'orientation relative de la cible

τ_{air} : Transmissivité de l'air caractérisant la capacité d'atténuation du flux rayonné par absorption atmosphérique.

Dans IFNAP, le **pouvoir émissif** peut être estimé selon 2 approches. Une approche énergétique simple en considérant la puissance surfacique rayonnée par la flamme comme une fraction de la puissance totale libérée par la combustion. L'autre approche disponible est celle développée par MUDAN ET CROCE, qui intègre l'incidence de la production de suies.

La **puissance surfacique rayonnée** est déterminée via la connaissance de la surface de la nappe au sol en feu et de la hauteur de flamme. IFNAP permet d'étudier tout type de surface de flaque : rectangulaire, circulaire, induite par un rejet continu ou suite à un éclatement de capacité. IFNAP propose différentes corrélations pour le calcul de la hauteur de flamme : THOMAS, HESKESTAT, MOORHOUSE, ZUKOVSKI et COX & CHITTY. La corrélation de THOMAS sera utilisée pour les feux de nappe de petite surface (Deq < 20 m) et celle d'HESKESTAT pour les incendies de surface plus importante n'impliquant pas d'hydrocarbures liquides.

Les **facteurs de forme** traduisent l'angle solide sous lequel la cible perçoit le rayonnement. Dans IFNAP, la flamme est assimilée à une forme géométrique simple (cylindre, polyèdre) : IFNAP considère les cas facteurs de forme associés à un cylindre droit et à un plan vertical.

Le **facteur de transmissivité atmosphérique** traduit le fait que les radiations émises sont en partie absorbées par l'air présent entre la surface radiante et la cible. IFNAP propose 3 corrélations : LANNOY, LIHOU & MAUND et BRZUSTOSWKI & SOMMER.

Enfin, IFNAP permet d'étudier les configurations définies par la **présence d'un mur coupe-feu** placé au droit de la surface au sol en feu, mais aussi pour un mur coupe-feu éloigné de la surface au sol en feu.

Des tests de comparaison pour différents feux ont été effectués entre la feuille de calcul IFNAP et les résultats présentés sur :

- Le document de l'INERIS *« Etude de scénarios dangereux en station-service » :* plus de 10 configurations ont été étudiées ;
- Le document de l'INERIS « *Analyse des risques associés à l'industrie papetière* » : 8 configurations ont été étudiées.

Les résultats de ces comparaisons sont les suivants :

Tableau 3 : Comparaison des distances d'effets pour des feux de liquides et des feux de solides

Type d'écarts		Formules utilisées	Ecart pour un feu de liquide*	Ecart pour un feu de solide*
Hauteur de flamme	Ecart minimum	Hauteur de flamme : Thomas	2%	0%
	Ecart moyen		6%	1%
	Ecart maximum		18%	8%
3 kW/m²	Ecart minimum	Hauteur de flamme : Thomas Pouvoir émissif : Mudan et Croce Transmissivité : Brzustowski et Sommer	0%	0%
	Ecart moyen		9%	2%
	Ecart maximum		17%	7%
5 kW/m²	Ecart minimum		0%	0%
	Ecart moyen		10%	4%
	Ecart maximum		23%	9%
8 kW/m²	Ecart minimum		/	6%
	Ecart moyen		/	10%
	Ecart maximum		/	14%

* : les écarts ne sont comptabilisés que si les seuils sont atteints

Afin de ne pas fausser les résultats sur le flux thermique, la formule de Thomas a été utilisée car l'INERIS a fait ces modélisations à partir de cette même formule. Ainsi, les différences notées pour la hauteur de flamme proviennent de la manière de calculer le diamètre équivalent.

Peu de divergences sont observées au niveau des écarts selon les dimensions des nappes. Par ailleurs, dans la grande majorité des cas, les résultats donnés par IFNAP majorent ceux donnés dans les documents de l'INERIS.

Ainsi, le peu de variations constatées entre les guides de l'INERIS et la méthode développée par Antea Group, et le caractère dimensionnant de l'outil, nous permettent de justifier de l'utilisation de la méthode caractérisée par Antea Group.

5.3.2. Explosion de gaz dans un local ou dans une structure

La méthode multi-énergie développée par TNO (chapitre 5.5 du Yellow Book de 1997) est utilisée pour déterminer les effets de surpression en cas d'explosion d'un nuage de gaz à l'air libre (UVCE) ou en milieu confiné et encombré (VCE), sauf dans le cas des enceintes fermées résistantes à la pression (explosion de réacteur, capacité prise dans un feu, …).

- **Etudier la présence de surface éventables**

Le local de stockage de batteries est composé de 4 parois en parpaing et d'une toiture en bardage métallique.
Cette dernière fait office de surface éventable.
Les surfaces éventables disponibles sont largement suffisantes[2] pour maintenir l'intégrité des parois béton du local.
Ainsi, le local de stockage de batteries est suffisamment éventé et la pression maximale d'explosion atteinte sera égale à la pression d'ouverture des « surfaces éventables ».

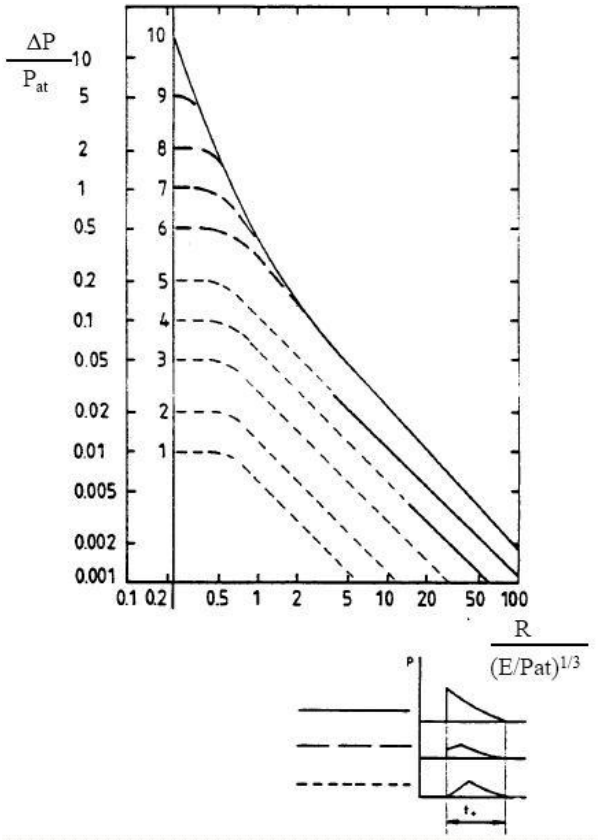
- **Choix de l'indice Multi-énergie**

Une explosion de gaz n'est susceptible d'engendrer de fortes surpressions que si les flammes atteignent une vitesse de propagation importante (plusieurs dizaines de m/s), ou si les gaz sont confinés par des parois solides.
Or, une flamme se propageant dans un mélange gazeux réactif accélère si le volume occupé par les gaz est caractérisé par la présence répétée d'obstacles et d'espaces partiellement confinés. Sans présence d'obstacles et d'espaces confinés, l'inflammation accidentelle des mélanges gazeux conduit généralement à des surpressions de faibles amplitudes (quelques centaines de Pa ou mbar).

Ainsi, la méthode Multi-Energie considère de nombreux paramètres qui ont une influence sur la vitesse de propagation des flammes, parmi lesquels peuvent être cités la densité d'obstacles, le degré de confinement, la forme et les dimensions du nuage inflammable, la réactivité du combustible, l'énergie et la position de la source d'inflammation, et la turbulence du mélange réactif avant allumage.

Pour l'application de cette méthode, la « violence » de l'explosion peut ensuite être caractérisée par un indice compris entre 1 et 10. L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé.
Les niveaux maximaux et les courbes d'atténuation de la surpression en fonction de la distance sont donnés, pour chaque indice, sur l'abaque ci-dessous :

[2] Cette évaluation est réalisée au moyen du logiciel WINVENT 4.0 basé sur les formules de la VDI 3673 et de la norme NF EN 14491.



Le guide Ω31 de l'INERIS, relatif à la phénoménologie et aux modélisations des explosions de gaz confinées, en date du 09/06/2022, indique « *qu'une problématique de l'explosion confinée dans une enceinte équipée d'un évent est la difficulté d'attribuer un indice d'explosion réduit pour mettre en œuvre la méthode Multi-Energy. Aucune règle n'ayant été établie pour prendre en compte l'effet de l'ouverture progressive d'un évent, on considère que l'enceinte subit un éclatement et l'indice retenu doit être 10, le plus sévère. Cette hypothèse est majorante, elle aboutit à la modélisation d'un choc se déplaçant dans l'air de manière isotrope. La phénoménologie comme l'expériences indiquent plutôt des propagations d'ondes de pression sonique, donc plutôt selon un indice de 1 à 9. On note que pour les effets réglementaires les indices de 6 à 10 conduisent aux mêmes résultats.* »

Ainsi il sera retenu l'indice de sévérité d'explosion 10 pour cette modélisation. Ceci est également cohérent avec la présence d'hydrogène comme gaz inflammable dans le local.

- **Effet de surpression**

L'énergie d'explosion peut être calculée à partir de la relation de Brode :

$$E_{explosion} = \frac{(P_{rup} - P_0) \cdot V}{\gamma - 1}$$

Avec

$E_{Explosion}$: énergie libérée par l'explosion (J)

P_{rup} : la pression de rupture (Pa)

P_0 : la pression atmosphérique (Pa)

V : le volume du local (rempli de gaz) (m^3)

γ: le rapport des chaleurs spécifiques (sans unité)

Ici, le rapport des chaleurs spécifiques (γ) est pris égale à 1,314. Cela correspond aux résidus des produits brulés (rapport INERIS Omega 15).

La pression de rupture de l'enceinte pourra être désignée sur la base de l'exploitation de la bibliographie scientifique consacrée (« Yellow Book », le « Guide de l'art des silos », INERIS, …) qui renseigne quant aux pressions d'explosion à considérer.

A noter qu'aucun effet thermique n'est attendu à l'extérieur du bâtiment (les effets thermiques sont liés au nuage inflammable qui est confiné dans le bâtiment).

5.4. Modélisation des phénomènes dangereux

5.4.1. PhD1 : Incendie des batteries de lithium-ion

5.4.1.1. Descriptif du scénario

La défaillance d'une batterie au lithium peut provoquer un emballement thermique, caractérisé par une augmentation rapide et incontrôlée de sa température. Ce phénomène est susceptible d'entraîner l'inflammation de la batterie puis la propagation de l'incendie aux autres batteries présentes dans le local.

Le futur local accueillera un maximum de 15 batteries lithium avec une puissance cumulée < 25kWh, réparties en 3 zones :

- 2 armoires DENIOS de stockage ;
- 3 étuves de stockage ;
- 3 étuves d'essais.

Les batteries sont séparées en 3 zones différentes et ne sont pas regroupées, limitant ainsi le risque de propagation.

Cependant, le scénario retenu correspond à l'incendie généralisé du local de stockage impliquant l'ensemble des batteries présentes sur l'ensemble de la surface du local, soit 56,24 m² (7.4m x 7.6m).
Ce scénario est donc majorant par rapport à la configuration réelle prévue pour le stockage des batteries.

5.4.1.2. Hypothèses

Les données d'entrée utilisées pour l'évaluation des distances d'effets de ce phénomène dangereux sont les suivantes :

Tableau 4 : Hypothèses - Incendie de batteries lithium

Paramètres	Données d'entrée
Méthode et outil	IFNAP
Surface de la zone en feu	Local de 7,4 m x 7,6 m Soit une surface de 56,24 m²
Caractéristiques des zones	Pas de murs coupe-feu (Aucune résistance au feu des murs en parpaing n'est prise en compte, de manière majorante, afin d'évaluer les effets maximaux de l'incendie.
Produits impliqués dans l'incendie	Les produits présents sont des batteries Li-ion. Pour les incendies de batteries, les principales hypothèses prises en compte sont issues du document de l'INERIS « Analyse d'un incendie dans un container de batteries et supercondensateurs - réponses aux questions du BEA-RI » en date du 28 juin 2021. Sur la base d'incendie réels, l'INERIS propose des hypothèses de calculs à prendre en compte dans les modélisations : • Hauteur de flamme calculée avec la formule de Thomas ; • Vitesse de combustion : 30 g/m²/s (valeur issue des essais réalisés par l'INERIS sur des feux d'électrolytes et de plastiques) ; • Pouvoir émissif de flamme : 60 kW/m² (valeur issue des essais réalisés par l'INERIS sur des feux de batteries).
Inventaire	15 batteries au maximum dans le local
Hauteur de cible	1,5 m (hauteur d'Homme)

5.4.1.3. Résultats

Les distances d'effets, calculées à partir de la zone en feu, sont présentées ci-dessous.

Tableau 5 : Résultats - Distances d'effets de l'incendie des batteries au lithium

	Distances des effets thermiques		
	SELS - 8 kW/m²	**SEL - 5 kW/m²**	**SEI - 3 kW/m²**
Sur la longueur L de la zone	11 m	14 m	18 m
Sur la largeur l de la zone	10 m	14 m	18 m

La hauteur de flamme est estimée à 8,8 m.

5.4.1.4. Synthèse

Le local batterie est situé à environ 43 m des limites de site. Aucun effet hors site n'est attendu.

A proximité du local batterie, se trouvent, un local transformateur, un groupe électrogène et une cuve de gasoil associée.
Ces installations sont situées dans la zone des effets dominos de l'incendie de batteries (8 kW/m²).

Note : Dans le cas du local avec des murs pyrotechniques anti-souffle et coupe-feu 2h et un plafond coupe-feu 2h en plaque de plâtre, les effets thermiques seraient contenus dans le local (en prenant en compte que les portes soient du même degré coupe-feu que la structure).

5.4.2. PhD2 : Explosion confinée dans le local batterie

5.4.2.1. Descriptif du scénario

Le scénario d'explosion étudié est consécutif à l'emballement thermique d'une ou plusieurs batteries au lithium. Les gaz inflammables (hydrogène notamment) libérés lors de ce phénomène peuvent s'accumuler dans le local semi-confiné. En présence d'une source d'ignition, leur inflammation peut provoquer une explosion et générer des effets de surpression.

5.4.2.2. Hypothèses

Tableau 6 : Hypothèses – Explosion

Paramètres	Données
Méthode et outils	TNO
Volume du local	210, m^3 (Local de 7,4 m x 7,6 m x 3,73 m)
Pression de rupture du local	• Pression de rupture des murs en parpaing : 200 mbar[3] • Pression de rupture d'une toiture en bardage métallique : 100 mbar[4] ➔ La toiture fait office de surface soufflable (superficie suffisante) ➔ La pression de rupture du local sera donc égale à la pression de rupture de la toiture soit 100 mbar
Présence d'évent ?	Non (assimilé à la toiture)
Pression de rupture retenue pour la modélisation	200 mbar (2 x 100 mbar ; non évenété)
Chaleur spécifique du gaz	1,314 (gaz de combustion)
Indice Multi Energie	10
Energie d'explosion	13,4 MJ
Hauteur de la cible	2 m (hauteur d'Homme)

5.4.2.3. Résultats

Les distances d'effets, calculées à partir du centre du local, sont présentées ci-dessous.

Tableau 7 : Résultats - Distances d'effets de l'explosion

Distances des effets de surpression à partir du centre du local			
SELS 200 mbar	**SEL 140 mbar**	**SEI 50 mbar**	**Bris de vitres 20 mbar**
9 m	12 m	26 m	52 m

3 Cas des murs en béton détruits (150 à 200 mbar). Cas majorant de 200 mbar retenu (Source : Rapport INERIS-DRA-2007-N° 46055/77288 - La résistance des structures aux actions accidentelles)

4 Cas d'un toit métallique soufflable de type bac acier assimilé à du bardage métallique (15 à 100 mbar). Cas 100 mbar majorant retenu (Source : Guide Silos)

5.4.2.4. Synthèse

Les effets de l'explosion sont contenus à l'intérieur du site.

Le local batterie est situé à environ 43 m des limites de site. Les effets directs sur la vie humaine (SEI, SEL et SELS) sont contenus à l'intérieur du site.
Seuls les effets indirects par bris de vitres sortent des limites de site au nord.

A proximité du local batterie, se trouvent, un local transformateur, un groupe électrogène et une cuve de gasoil associée.
Ces installations sont situées dans la zone des effets dominos de surpression (200 mbar).

Note : Les résultats de ce phénomène dangereux sont identiques dans le cas modélisé ci-avant et dans le cas avec des murs pyrotechniques anti-souffle et coupe-feu 2h et un plafond coupe-feu 2h en plaque de plâtre.
En effet, la surpression générée dépend de la toiture en bac acier simple peau et non des murs ou du plafond en plâtre.

ANNEXE 1 : CARTOGRAPHIES DES DISTANCES D'EFFETS DES PHENOMENES DANGEREUX