



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département

Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Etude des effets dominos et optimisation de la surveillance des paramètres critiques des Process à haut risque - cas du centre de maintenance BHGE-ALGESCO

Hind Bouchra MENAI & Tiziri AIT MESSAOUD

Sous la direction de :

M. Bouzid BENKOUSSAS, Professeur à l'ENP
M. Amine BENMOKHTAR, Maitre-Assistant à l'ENP
M. Badreddine BOUSBAI, HSE Leader à BHGE - ALGESCO

Présenté et soutenu publiquement le 20 - 06 - 2018 devant le jury composé de :

<i>Président</i>	Mme Djamila HARIK,	Professeur à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Bouzid BENKOUSSAS,	Professeur à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Amin BENMOKHTAR,	Maitre-Assistant à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Badreddine BOUSBAI,	HSE Leader à BHGE - ALGESCO
<i>Examineur</i>	M. M'hamed BOUSBAI,	Maitre Conférences B à l'ENP



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département

Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Etude des effets dominos et optimisation de la surveillance des paramètres critiques des Process à haut risque - cas du centre de maintenance BHGE-ALGESCO

Hind Bouchra MENAI & Tiziri AIT MESSAOUD

Sous la direction de :

M. Bouzid BENKOUSSAS, Professeur à l'ENP
M. Amine BENMOKHTAR, Maitre-Assistant à l'ENP
M. Badreddine BOUSBAI, HSE Leader à BHGE - ALGESCO

Présenté et soutenu publiquement le 20 - 06 - 2018 devant le jury composé de :

<i>Président</i>	Mme Djamila HARIK,	Professeur à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Bouzid BENKOUSSAS,	Professeur à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Amin BENMOKHTAR,	Maitre-Assistant à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. Badreddine BOUSBAI,	HSE Leader à BHGE - ALGESCO
<i>Examineur</i>	M. M'hamed BOUSBAI,	Maitre Conférences B à l'ENP

ملخص

الهدف من هذا العمل دراسة التأثير دومينو وتحسين وسائل مراقبة العمليات عالية الخطورة عل مستوى مركز صيانة آلات التوربين ALGESCO.

تمت تجزئة الدراسة الى فصلين. يتضمن الفصل الأول دراسة التأثير دومينو وذلك من خلال تطبيق طريقة تقييم المخاطر QRA، من أجل تحديد وتقييم كل سيناريوهات الدومينو المحتمل وقوعها في ALGESCO. يتناول الفصل الثاني من الدراسة مسألة خدمة التدخل والوسائل الكفيلة بتحسينه، بالإضافة إلى اقتراح نموذج أولي من لوحة القيادة الرقمية المتصلة التي ستسمح بتحسين مراقبة المغيرات الحرجة للعمليات عالية الخطورة.

كلمات مفتاحية: التأثير دومينو، شعاع التسلق، QRA، المحاكات، التدخل، الهروب، لوحة القيادة.

Abstract

The aim of this present work is to study the domino effects and how to optimize the means of monitoring high-risk processes at ALGESCO's turbomachinery maintenance center.

Our study is divided up into 2 parts. The first part includes domino effects study and this will be demonstrated through the application of the QRA method, both to identify and evaluate all domino scenarios likely to occur in ALGESCO. The second part discusses the intervention service and the multiple possibilities to improve it, as well as the proposal for a prototype of a connected digital dashboard that will better the monitoring of critical parameters of high-risk processes.

Keywords : Domino effect, escalation vector, QRA, simulation, intervention, evacuation, dashboard.

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude des effets dominos et l'optimisation des moyens de surveillance des process à haut risque au niveau du centre de maintenance des turbomachines d'ALGESCO.

Dans une première partie nous avons réalisé l'étude des effets dominos à travers l'application de la méthode QRA, afin d'identifier et évaluer l'ensemble des scénarios dominos susceptibles de se produire à ALGESCO. La seconde partie de l'étude aborde la question du service d'intervention et les moyens à mettre en place pour l'améliorer, ainsi que la proposition d'un prototype de tableau de bord digital connecté qui permettra d'optimiser la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque.

Mots clés : Effet domino, vecteur d'escalade, QRA, simulation, intervention, évacuation, tableau de bord.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation du mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Qualité Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels (QHSE-GRI).

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury qui apporteront la touche finale à notre projet.

A Madame HARIK, D. Professeur à l'ENP pour sa disponibilité et son aide précieuse durant l'élaboration de ce mémoire et qui nous fait l'honneur de présider ce jury

A Monsieur BOUSBAI, M Maître de conférences B à l'ENP, qui a bien voulu accepter d'examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier nos encadreur pour leur soutien et aide tout au long de ce mémoire :

Monsieur BENKOUSSAS, B. Chef du département MRIE et professeur à l'ENP et Monsieur BENMOKHTAR, A. Maîtres-Assistants à l'ENP pour leurs précieux conseils.

Monsieur BOUSBAI, B. HSE Leader à ALGESCO, pour nous avoir donné la chance d'effectuer notre projet de fin d'étude au sein d'ALGESCO, de nous avoir accompagné et donné de son temps.

Nos remerciements s'adressent également à nos chers camarades et amis BENHOURIA Abdelmounaam, YOUNSI Yacine et ARFI Fawzi pour leur aide précieuse et leurs conseils avisés.

Notre gratitude va également à tous les enseignants du Département MRIE de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à notre formation et notre suivi durant notre passage à l'Ecole.

Dédicaces

A la mémoire de ma grand-mère,

A mes parents,

A ma sœur Tamila et mon frère Mazigh,

A ma Meilleure Amie Ouarda,

A ma Chère binôme et Amie Bouchra avec qui j'ai tout partagé durant ces quatre derniers mois,

Je dédie ce modeste travail.

Tiziri

A celle qui a sacrifié toute sa vie pour faire de moi la personne que je suis aujourd'hui...

Celle qu'aucun mot ne peut exprimer ma reconnaissance et mon amour... Ma chère maman

A une femme exceptionnelle et très chère pour moi... ma deuxième mère... ma tante Zohra

A celui que je veux rendre fière... Mon père

A celui qui a toujours été là pour moi... mon frère Mohamed Adnane

A la petite version de moi, ma confidente, ma moitié... my criminal partner Nihad

A la merveilleuse dont je suis tellement fière... the best big sister ever Noussaiba

A la personne que j'ai la chance d'avoir comme amie et binôme... l'adorable Tiziri

A ceux qui me rendent plus heureuse dans la vie, ma deuxième famille: Fawzi, Yacine, Moncef, Karim, Tarik, Walid, Manel, Kaouther, Amina & Imène.

Je dédie ce modeste travail.

Hind Bouchra

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Liste des abréviations

Glossaire

Introduction générale.....	19
I. Contexte général de l'étude.....	23
I.1. Présentation de l'entreprise	23
I.1.1 Algerian Engineering Services Company	23
I.1.2. L'entreprise mère « General Electric »	24
I.1.3. Fusion entre GE Oil & Gas et Baker Hughes	25
I.2. Description des process à haut risque	27
I.2.1. Traitement thermique (four sous vide)	27
I.2.2 Revêtement thermique (Cabine de coating)	29
I.3. Généralités sur les effets dominos	30
I.3.1. Définition et caractéristiques des accidents à effet domino	31
I.4. Problématique et objectifs de l'étude	34
I.5. Méthodologie	35
II. Analyse des risques par la méthode QRA pour les effets dominos.....	40
II.1. Détermination de la zone de l'étude.....	40
II.2. Présentation de la méthode QRA	43
II.2.1 Explication des différentes étapes de la QRA	45
II.2.1.1. Identification des événements primaires	45
II.2.1.2. Sélection d'un effet	45
II.2.1.3. Evaluation de la propagation	45
II.2.1.4. Identification des cibles	48
II.2.1.5. Calcul de la probabilité d'escalade pour chaque cible	49
II.2.1.6. Détermination des scénarios secondaires crédibles	54
II.2.1.7. Identification des scénarios dominos les plus crédibles	54
II.2.1.8. Evaluation des scénarios dominos	60
II.2.1.9. Deuxième niveau de l'étude	60
II.2.1.10. Calcul et représentation des indices significatifs de risque	60

II.3. Application de la méthode QRA	65
II.3.1. Détermination des événements primaires et leurs fréquences	65
II.3.2. Application des étapes de la QRA : de l'étape 2 à l'étape 10	66
II.3.2.1. Sélection des l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique	69
II.3.2.2. Sélection de l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique	90
II.3.2.3. Sélection événements primaires « Explosion du four sous vide »	98
II.3.2.4. Sélection de l'événement primaire « Incendie du four sous vide »	103
II.3.2.5. Calcul des indices de risques	112
III. Optimisation du service d'intervention d'ALGESCO	120
III.1. Moyens à mettre en place pour faire face aux accidents catastrophiques.....	120
III.1.1 Planification de la Continuation des Activités (PCA)	120
III.1.2. Comment se prémunir des accidents à effets dominos	121
III.2. Evaluation du service d'intervention incendie d'ALGESCO	122
III.2.1 Présentation de l'APSAD R6	123
III.2.2. Moyens dont dispose l'entreprise pour faire face aux incendies	123
III.2.2.1. Moyens matériels	123
III.2.2.2. Moyens humains	124
III.2.3. Recommandation et mesures d'amélioration	125
III.2.3.1. Recommandation et mesures d'amélioration des moyens matériels	125
III.2.3.2. Organisation du service d'intervention	143
III.3. Proposition d'un modèle d'évacuation	150
III.3.1 Présentation du logiciel Pathfinder®	154
III.3.2. Résultats de la simulation Pathfinder®	155
IV. Optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque	161
IV.1. Apport d'un tableau de bord digital connecté dans la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque	161
IV.1.1 Analyse du besoin de l'entreprise	161
III.1.2. Avantages de l'implémentation d'un tableau de bord digital connecté au sein d'ALGESCO	164
IV.2. Mise en place du tableau de bord digital connecté	164
III.2.1 Architecture du tableau de bord	167
IV.3. Prototype de l'application mobile.....	168
Conclusion générale	170
Bibliographie.....	173
Annexes	175

Liste des figures

Figure 1.1 Emplacement géographique d'ALGESCO	23
Figure 1.2 Sites d'implantation et d'intervention de GE en Algérie.....	25
Figure 1.3 Activités de l'entreprise General Electric	26
Figure 1.4 Four sous vide	27
Figure 1.5 . Schéma explicatif du processus de traitement thermique	28
Figure 1.6 Cabines de revêtement thermique	29
Figure 1.7 Schéma explicatif du processus de revêtement thermique	30
Figure 1.8 Schéma explicatif d'une chaîne domino	131
Figure 1.9 Schéma explicatif d'une propagation parallèle complexe	132
Figure 1.10 Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos	17
Figure 2.1 Emplacement des process à haut risque au niveau du centre de maintenance d'ALGESCO	21
Figure 2.2 Aménagement et distances séparant les différentes unités dont est constituée la zone étudiée.....	22
Figure 2.3 Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos	44
Figure 2.4 Fonction probit (Φ^{-1}).....	30
Figure 2.5 Fonction de répartition loi normale centrée réduite (Φ).....	30
Figure 2.6 Schématisation des composantes d'un réseau Bayésien.....	55
Figure 2.7 Modèle de propagation probable d'un effet domino dans une usine à six unités (X1 à X6). Les nombres entre parenthèses indiquent l'ordre séquentiel possible des événements.	56
Figure 2.8 Réseau bayésien modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L1 et L2, respectivement.	58
Figure 2.9 Réseau bayésien modifié pour incorporer les 3 niveaux d'effet domino et l'union des événements tertiaires et quaternaires	60
Figure 2.11 Exemple d'un diagramme F-N qui représente les résultats d'une QRA.....	641
Figure 2.12 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement primaire « VCE dans la cabine de coating N°1 »	70

Figure 2.13 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement primaire « VCE dans la cabine de coating N°2 »	71
Figure 2.14 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N° 1 à $t = 2,1057e-3$ sec.	73
Figure 2.15 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N°1 à $t = 5,0002 e-3$ sec	73
Figure 2.16 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N° 1 à $t = 5,0002 e-3$ sec – vue de face.	73
Figure 2.17 Propagation de l'effet de surpression suite à l'évènement secondaire explosion du rack N° 01 d'H ₂ de la station du coating.....	79
Figure 2.18 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H ₂ dans la zone de stockage » suite à la synergie entre l'événement primaire «VCE au niveau de la cabine de coating N°1 » et l'événement secondaire « Explosion du rack N° 02 d'H ₂ de la station de coating »	83
Figure 2.19 Déformations élastiques équivalentes du sol et du cylindre représentant la citerne d'O ₂ à $t = 2,0002 e-3$ sec –vue de face-	84
Figure 2.20 Déformations élastiques équivalentes du sol et du cylindre représentant la citerne d'O ₂ à $t = 2,0002 e-3$ sec.....	85
Figure 2.21 Réseau Bayésien de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».....	88
Figure 2.22 Réseau Bayésien de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».....	89
Figure 2.23 Rose des vents de Boufarik.....	91
Figure 2.24 Visualisation de la température à $t = 5$ min et $H = 1.50$ m pour la condition météorologique $T = 35^{\circ}\text{C}$, vitesse du vent = 1.5 m.s-1	92
Figure 2.25 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique »	97
Figure 2.26 Propagation de l'effet de surpression pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide N°1 »	99
Figure 2.27 Propagation de l'effet de surpression pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide N°2 »	100

Figure 2.28 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire «Explosion du rack 1 d'H2 pré du four » suite à l'événement primaire « surchauffe du four sous vide »	107
Figure 2.29 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire «Explosion du rack 2 d'H2 pré du four » suite à l'événement primaire « surchauffe du four sous vide »	108
Figure 2.30 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°1 ».....	111
Figure 2.31 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°2 ».....	112
Figure 2.32 contour du risque individuel correspondant à la propagation du VCE au niveau de la cabine de coating N°1	114
Figure 2.33 graphe représentant les fréquences cumulées en fonction de personne exposées.....	116
Figure 3.1 Répartition des zones rez-de-chaussée.....	127
Figure 3.2 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 1 : Magasin.....	132
Figure 3.3 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 2 : Partie statorique du shop	133
Figure 3.4 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 3 : Laboratoire de métallurgie.....	134
Figure 3.5 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 4 : Station de décapage chimique	135
Figure 3.6 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 5 : Partie rotorique du shop	136
Figure 3.7 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 6 : Bureaux du rez-de-chaussée.....	137
Figure 3.8 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 7 : Bureaux à l'étage	138
Figure 3.9 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 8 : Stockage du kérosène et des gaz	139
Figure 3.10 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 9 : Stockage des déchets	140
Figure 3.11 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 10 : Groupe électrogène.....	141

Figure 3.12 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 11 : Parking	142
Figure 3.13 Emplacement ds équipes de 1er intervention (EPI) dans le shop	147
Figure 3.14 Plan d'évacuation proposé pour le rez-de-chaussée	152
Figure 3.15 Plan d'évacuation proposé pour le niveau 1	153
Figure 3.16 Graphe représentant le nombre de personnes évacuées du niveau R+1 en fonction du temps.	156
Figure 3.17 Graphe représentant le nombre de personnes évacuées du rez-de-chaussée en fonction du temps.	156
Figure 3.18 Vitesses des occupants à t=3.5sec – vue de dessus (niveau R+1)	157
Figure 3.19 Densité d'occupation à t=9.5 sec – vue de dessus (niveau R+1)	157
Figure 3.20 Densité d'occupation à t=9.5 sec – vue de dessus (niveau R+1)	158
Figure 3.21 Vitesses des occupants à t=17.1sec – vue de dessus (rez-de-chaussée)	158
Figure 4.1 Schéma descriptif explicitant l'interconnexion entre les lignes des citernes de stockages qui alimentent les procces de revêtement et traitement thermique.	163
Figure 4.2 Principe de fonctionnement du tableau de bord et emplacement des capteurs de pression.....	166
Figure 4.3 Exemple d'affichage pour le tableau de bord	168
Figure 4.5 Prototype de l'application mobile « IC »	169

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Les différentes catégories d'évènements dominos.....	33
Tableau 2.1 Seuils des effets de radiation thermique sur l'Homme	26
Tableau 2.2 Seuils des effets de radiation thermique sur les structures.....	47
Tableau 2.3 Seuils des effets de surpression sur l'Homme.....	27
Tableau 2.4 Seuils des effets de surpression sur les structures	48
Tableau 2.5 Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique	49
Tableau 2.6 Modèles de vulnérabilité	53
Tableau 2.7 Table des probabilités conditionnelles attribuées au nœud auxiliaire L1 montrant sa dépendance conditionnelle à l'égard de ses parents par le biais d'une porte logique «OU»	59
Tableau 2.8 Calcul des fréquences cumulées.....	64
Tableau 2.9 Evénements redoutés centraux et événements primaires se produisant au niveau des unités des process à haut risque d'ALGESCO Fréquences d'occurrence des événements primaires.....	65
Tableau 2.10 Fréquences d'occurrence des événements primaires	66
Tableau 2.11 Unités critiques, événements primaires, type de propagation et effets physiques correspondants	67
Tableau 2.12 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire «VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».	69
Tableau 2.13 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino pour chaque cible touchée par l'événement primaire l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».....	76
Tableau 2.14 Scénarios secondaires les plus susceptibles de se produire suite à l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».....	77
Tableau 2.15 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H2 de la station de coating» émanant de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».	78
Tableau 2.16 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour chaque cible dus à la synergie de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 » et l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H2 de la station de coating »	81

Tableau 2.17 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement tertiaire «Explosion des racks d'H2 de la zone de stockage» émanant de l'événement primaire «VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».	82
Tableau 2.18 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de troisième niveau pour l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H2 de la zone de stockage» dus à l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».	86
Tableau 2.19 Résultats extraits de PyroSim® pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station thermique ».	93
Tableau 2.20 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique ».	94
Tableau 2.21 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique ».	96
Tableau 2.22 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire «Explosion du four sous vide ».	98
Tableau 2.23 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide ».	102
Tableau 2.24 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Incendie du four sous vide ».	105
Tableau 2.25 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement secondaire « Explosion du rack d'H2 pré du four » dû à l'événement primaire « Surchauffe du four sous vide ».	106
Tableau 2.26 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour l'événement secondaire « Explosion rack d'H2 pré du four » dû à l'événement primaire « Surchauffe du four sous vide ».	110
Tableau 2.27 Fréquence domino de chaque niveau et la fréquence cumulée pour l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».	115
Tableau 3.1 Moyens de prévention/protection des risques majeurs des process à haut risque proposé par les études antérieures.	122
Tableau 3.2 Moyens matériels à disposition d'ALGESCO pour l'intervention contre les incendies.	124
Tableau 3.3 Dotations correspondantes à des quantités de liquide ou de gaz inflammables stockées en extérieur.	129
Tableau 3.4 Répartition des extincteurs sur les différentes zones du site d'ALGESCO.	130
Tableau 3.5 Effectif des équipes d'intervention selon la procédure d'intervention.	145

Tableau 3.6 Effectifs des équipes d'intervention par zone 145

Nomenclature

\mathbf{F}_{ed} : Fréquence d'occurrence annuelle de la séquence domino (installation j impactée suite à un accident dans i) (ans^{-1}).

\mathbf{F}_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement primaire (ans^{-1}).

\mathbf{F}_{erc} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement redouté central (ans^{-1}).

i : Equipement source de l'accident.

\mathbf{I}_{ij} : Intensité des radiations thermique (kW.m^{-2}).

j : Equipement cible.

$\Delta\mathbf{P}_{ij}$: Surpression statique (kPa).

\mathbf{P}_1 : Probabilité du scénario primaire.

\mathbf{P}_{ij} : Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i .

\mathbf{V} : Volume de l'équipement (m^3).

\mathbf{v} : Coefficient stœchiométrique.

\mathbf{Y}_{ij} : Fonction probit.

Liste des abréviations

ALGESCO : Algerian Engineering Services Company.

BHGE : Baker Hughes a GE company

EIT : Equipe d'Intervention Technique.

EPI : Equipe de Première Intervention.

ESI : Equipe de Seconde Intervention.

GE : General Electric.

HRRPUA : Heat Release Rate Per Unit Area (kW.m^{-2}).

IdO : Internet des Objets.

PCA : La Planification de la Continuation des Activités.

PRSU : Procédure de Réponse aux Situations d'Urgence.

RIA : Robinet d'Incendie Armé.

SIS : Système Instrumenté de Sécurité.

VCE : Vapor Cloud Explosion.

Glossaire

- **Accident domino :**
Accident où un événement primaire non désiré se propage donnant lieu à un ou plusieurs événements secondaires non désirés avec des conséquences plus importantes que l'événement primaire.
- **Alarme :**
Enchaînement des différentes actions (techniques et organisationnelles) permettant l'intervention des secours interne et l'information des occupants pour l'application des consignes internes
- **Alerte :**
Ensemble des actions permettant l'information des secours extérieurs de la survenue d'un incendie.
- **Chaîne dominos :**
Séquence d'évènements dans laquelle on suppose un modèle de propagation simple de l'événement primaire : l'événement primaire provoque un événement secondaire, qui à son tour peut provoquer un événement tertiaire, etc.
- **Effet domino :**
Propagation d'un événement primaire causant des événements secondaires.
- **Effets physiques :**
Effets des incendies (habituellement exprimés sous forme d'intensité du rayonnement de flamme), des ondes de souffle (habituellement exprimées par la surpression statique maximale de pointe) ou des dispersions toxiques (habituellement exprimées sous forme de la concentration de la substance toxique dans l'air en fonction du temps).
- **Escalade :**
Propagation d'un événement primaire entraînant l'intensification des conséquences globales.
- **Escalade directe :**
Propagation et intensification des conséquences globales d'un événement primaire en raison des dommages directs causés à l'équipement secondaire par l'effet du rayonnement, de l'onde de souffle ou de l'impact d'un fragment.

- **Escalade indirecte :**

L'escalade d'un événement primaire dans lequel les scénarios secondaires ne sont pas causés par un dommage direct de l'équipement. Les erreurs de l'opérateur et les dommages des structures civiles (entrepôts, structures de soutien, etc.) peuvent être identifiés comme étant les mécanismes d'escalade indirecte les plus probables.

- **Événement domino :**

Accident dans lequel se produit un effet domino.

- **Propagation :**

Dans le cas d'un effet domino spatial, la propagation indique l'implication d'autres unités ou équipements, présents en différentes positions par rapport à celle de l'accident primaire. Dans le cas d'un effet domino à propagation temporelle, il y a propagation dans le temps à l'intérieur d'une même unité ou d'un même équipement.

- **Scénario domino :**

Scénario d'accident global qui se produit en raison de l'escalade d'un événement primaire entraînant un accident domino

- **Scénario primaire :**

Scénario d'accident qui se déclenche en premier, propageant et s'escaladant vers d'autres unités, entraînant un ou plusieurs scénarios d'accident secondaires.

- **Scénario secondaire :**

Scénario d'accident causé par l'impact d'un vecteur d'escalade généré par un scénario d'accident primaire.

- **Seuil d'escalade :**

Valeur des effets physiques au-dessus de laquelle l'escalade d'un scénario primaire a lieu, en raison des dommages causés à une unité secondaire et du potentiel d'escalade des scénarios secondaires qui peuvent en résulter.

- **Seuil de dommages :**

Valeur des effets physiques au-dessus de laquelle on s'attend à ce que l'équipement secondaire considéré soit endommagé.

- **Séquence domino :**

Séquence d'événements résultant d'un scénario domino.

- **Vecteur d'escalade :**

Vecteur d'effets physiques générés par le scénario d'accident primaire.

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie étant un pays riche en énergie fossile, des champs d'extraction de pétrole et de gaz naturel se sont rapidement développés dans le sud algérien. Sur le terrain, l'utilisation de turbomachines est indispensable pour la réalisation des différentes opérations d'extraction. Très vite, la nécessité de disposer d'un centre de maintenance s'est imposée. Dans ce contexte économique, l'entreprise américaine General Electric s'est associée aux entreprises algériennes Sonatrach et Sonelgaz pour créer ALGESCO, qui depuis 2010 est basé à Boufarik et est considéré comme le plus grand centre de maintenance de turbomachines dans le monde.

Les travaux de maintenance englobent plusieurs process de traitement. Certains procédés, de par les substances utilisées ou l'énergie emmagasinée, constitue un danger pour la sécurité du personnel et le reste des équipements du site. Afin de gérer au mieux ces dangers, l'entreprise a réalisé diverses études de risque mais en ne prenant pas en compte les effets dominos. L'effet domino étant la propagation spatiale ou temporelle d'un événement primaire provoquant d'autres événements secondaires [1]. Ces derniers ont simplement été cités comme étant des accidents majeurs mais aucune étude n'a jamais été réalisée.

Pourtant le danger dû aux effets dominos est bien connu et pris en compte dans la législation et les normes de sécurité. En effet, en Europe le risque d'effet domino est reconnu dans la législation depuis la première directive Seveso (directive 82/501/CEE), qui exigeait l'évaluation des risques à effet domino dans toutes les installations. D'où la nécessité d'identifier et évaluer l'ensemble des scénarios dominos dont ALGESCO pourrait être victime et cela à travers l'application de la méthode QRA pour les effets dominos.

L'objectif principal de notre étude est de répondre à la question : « ALGESCO peut-elle faire face à des accidents à effet domino ? Et quel moyen optimiserait la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque ? ».

Pour ce faire, nous avons divisé notre travail en deux parties. La première comporte l'étude des effets dominos et la seconde traite de l'optimisation du service d'intervention d'ALGESCO afin qu'elle puisse être en mesure de faire face aux accidents dominos, et l'optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres et s'organise de la façon suivante :

Le **premier chapitre** comporte une présentation de l'entreprise et de ses process à haut risque ainsi que quelques généralités sur les effets dominos, ce qui nous a permis de poser la méthodologie à suivre pour répondre à la problématique.

Le **second chapitre** représente le cœur de l'étude des effets dominos, il est constitué d'une partie théorique sur la QRA puis son application à travers le cas d'ALGESCO en s'appuyant sur les logiciels PHAST®, PyroSim® et ANSYS STRUCTURAL® pour la simulation de la propagation des effets.

Le **troisième chapitre** traite de l'optimisation du service d'intervention d'ALGESCO, en débutant par l'évaluation des moyens dont dispose l'entreprise pour faire face aux sinistres puis la proposition de mesures d'amélioration de type organisationnel en mettant en place une nouvelle structure du service d'intervention. Une nouvelle répartition des moyens de première intervention sur l'ensemble du site a également été réalisé en appliquant la règle APSAD R4 afin d'assurer une intervention optimale. Le chapitre finit par la proposition d'un modèle d'évacuation du personnel, en s'appuyant sur le logiciel Pathfinder®.

Le **quatrième chapitre** présente le moyen que nous avons choisi pour optimiser la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque qui est, en l'occurrence, la mise en place d'un tableau de bord digital, cela en plaçant des capteurs connectés afin de partager l'information sur une interface disponible pour tous les opérateurs et responsables afin d'améliorer la communication entre les process et optimiser la surveillance de ces derniers.

Première partie

Etudes des effets dominos

Chapitre I

Contexte général de l'étude

I. Contexte général de l'étude

Introduction

Après une brève présentation de l'entreprise BHGE et du site de maintenance d'ALGESCO, le contexte général de l'étude sera défini. Nous donnerons quelques généralités sur les effets dominos et nous décrirons les process à haut risque présents sur le site afin de bien comprendre la problématique posée par l'entreprise et enfin nous terminerons par la présentation de la méthodologie suivie pour la résoudre.

I.1. Présentation de l'entreprise

I.1.1. Algerian Engineering Services Company

Née d'un partenariat entre le groupe américain General Electric, Sonatrach et Sonelgaz en 1993, l'entreprise ALGESCO (Algerian Engineering Services Company) était à l'origine située à Hassi R'mel et s'occupait de la réparation et de la maintenance des turbines à gaz. Elle fut par la suite transférée sur son nouveau site industriel à Boufarik en 2010.

ALGESCO devint alors, le plus grand centre de maintenance dédié aux turbomachines à l'échelle mondiale. Ses capacités de réparation comprennent les turbines à gaz et à vapeur, les compresseurs centrifuges et alternatifs.

Le centre, d'une superficie moyenne de près de 14.000 m², d'un effectif de 238 employés et d'un investissement de 36 millions de dollars, représente un support pour le secteur pétrolier et gazier ainsi que pour la production d'électricité en Algérie. ALGESCO fournit également des services de surveillance et de diagnostic à distance 24h/24. [2]

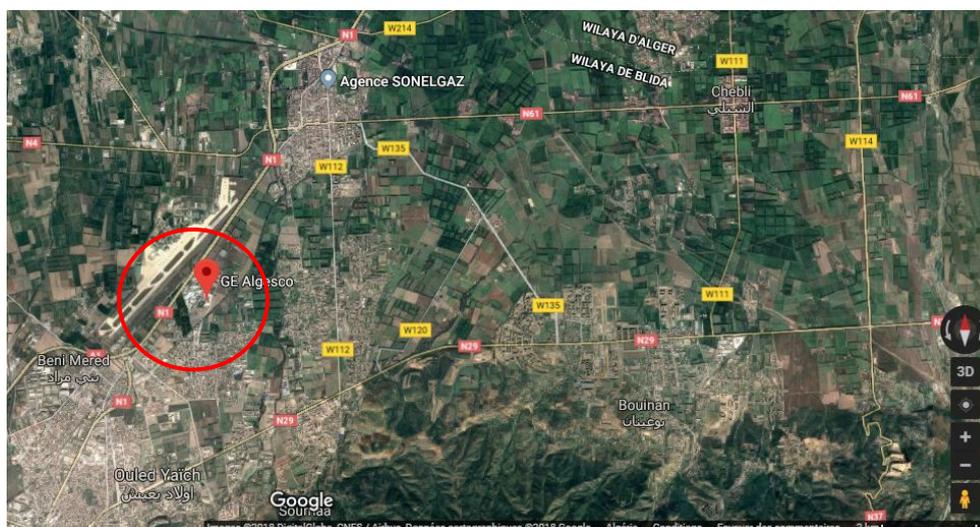


Figure 1.1 Emplacement géographique d'ALGESCO

I.1.2. L'entreprise mère « General Electric »

Depuis sa création en 1892, par la fusion d'une partie de Thomson-Houston Electric Company et d'Edison General Electric Company, le groupe industriel numérique mondial General Electric s'est démarqué par ses services et produits, ses solutions proposées, sa taille et ses investissements.

Avec plus de 31 filiales, GE avait étendu son champ d'activités à plusieurs secteurs, comme le montre la figure 1.2.

- **GE Energy Infrastructure** dont les principales activités sont GE Power and Water, GE Energy Services et GE Oil and Gas.
- **GE Technology Infrastructure** qui englobe GE Aviation, GE Transportation, GE Healthcare et GE Enterprise Solutions.
- **GE Capital** qui rassemble tous les services et solutions financières proposées par GE comme les assurances, les financements, les cartes crédits, etc.
- **GE Consumer & Industrial** qui est la branche la plus large en terme d'activité, propose une gamme de composants électriques, d'appareils de commande, de moteurs ainsi que des solutions d'ingénierie pour l'automatisation des processus industriels.

Dès 2014, GE se sépare de la majorité de ses activités financières afin de se recentrer sur les activités industrielles en consacrant ses meilleurs effectifs et ses meilleures technologies pour relever les défis les plus complexes dans ce secteur et en 2015, elle regroupe ses activités liées au numérique et au logiciel dans une nouvelle branche nommée **GE Digital**.

En Algérie, GE est présente depuis plus de 40 ans. Elle participe dans le développement du pays à travers sa collaboration dans 4 grands secteurs : GE power, GE Healthcare, GE Aviation et GE Oil & Gas. [3]

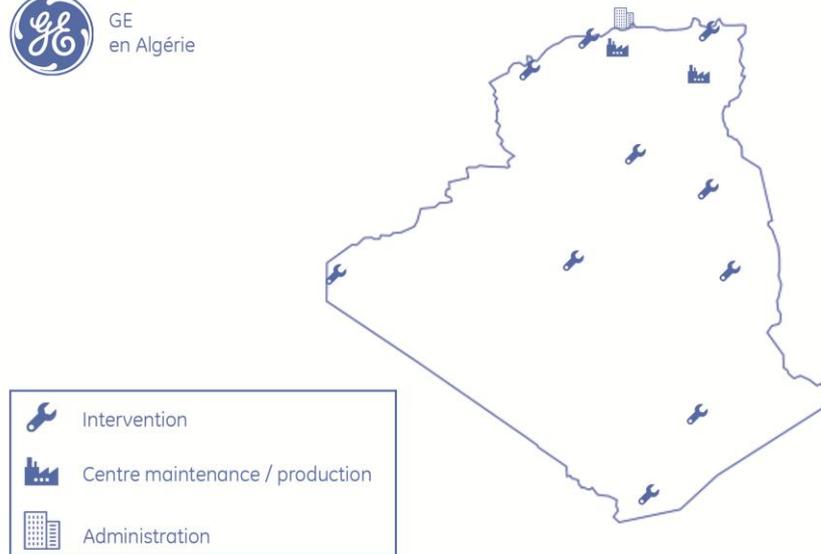


Figure 1.2 : Sites d'implantation et d'intervention de GE en Algérie

A travers son engagement, ses solutions et services de pointe, GE a pu aller encore plus loin dans son investissement dans le domaine pétrolier en Algérie à travers la filiale ALGESCO qu'elle détient à 52%.

I.1.3. Fusion entre GE Oil & Gas et Baker Hughes

En Juillet 2017, l'opération de fusion des activités de pétrole et de gaz de GE Oil & Gas avec Baker Hughes, troisième acteur mondial reconnu par sa flotte de plates-formes de forage et ses services pour l'industrie pétrolière, a été officiellement achevée.

GE qui cherchait depuis longtemps à se renforcer et faire un grand pas dans le secteur de l'énergie, racheta 62,5% de Baker Hughes. C'est ainsi que le groupe GE marqua une nouvelle ère dans l'industrie; BHGE étant la seule et unique entreprise qui propose une offre *Fullstream*, c'est à dire, qui couvre la totalité des activités pétrolières : en amont, en aval ainsi que le transport à travers ses équipements, ses services et ses solutions numériques.

La nouvelle entreprise vise à intégrer le numérique au monde physique pour accroître la fiabilité et la disponibilité en se basant sur les techniques de fabrication de pointe et les solutions d'automatisation intelligentes tout en réduisant les risques et en améliorant la productivité des opérations. Il est a constaté que GE a gardé pratiquement tous ses principes et ses procédures. Concernant le HSE, les deux entreprises ont combiné leurs politiques, BH ayant toujours été reconnu dans le milieu de l'industrie par sa performance en termes de sécurité industrielle. [4]

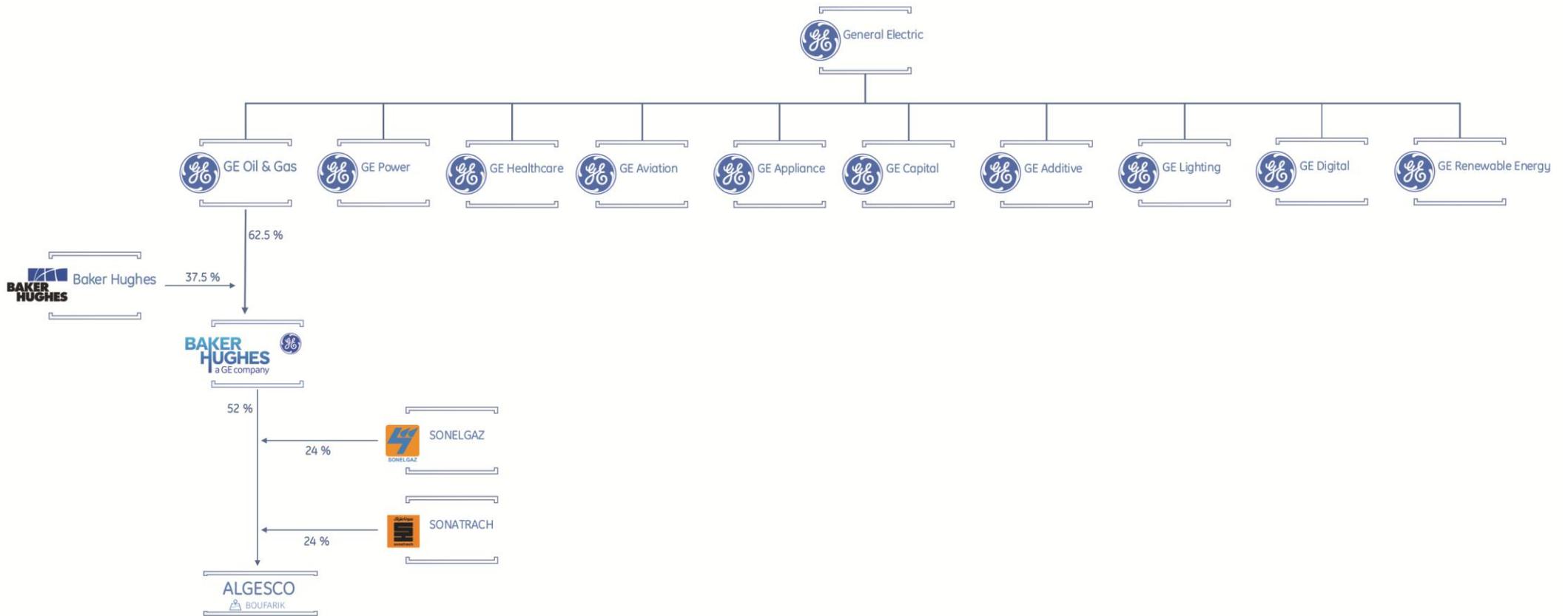


Figure 1.3. Activités de l'entreprise General Electric

I.2. Description des process à haut risque

Lors du processus de maintenance d'une turbine à gaz, ses différents composants passent par plusieurs procédés de traitement dans le but d'augmenter la durée de vie des pièces et le rendement de la turbine.

Le traitement des composants ne suit pas un ordre préétabli. Dans un premier temps, toute pièce (ailettes, aubes, liners...) doit passer par une inspection (contrôle géométrique et dimensionnel, un contrôle non destructif...) afin de déterminer le type de traitement recommandé.

Les processus de revêtement et de traitement thermique sont considérés comme à haut risque par l'entreprise, comme l'ont montré les études antérieures, ils feront donc l'objet de notre étude pour la détermination des événements primaires.

I.2.1. Traitement thermique (fours sous vide)



Figure 1.4. Four sous vide

La pièce subit dans un premier temps un cycle de chauffage à des températures supérieures à 1200°C dans un environnement sous vide maintenue grâce aux différentes pompes du four. Cette première phase permet de faire remonter à la surface les impuretés et faire apparaître les fissures profondes de la pièce puis un cycle de refroidissement, assuré par des gaz (argon et azote) alimenté à partir de la zone de stockage. Cette zone comporte trois

citernes de gaz liquéfiés : argon, azote et oxygène, elle alimente les deux fours sous vide et les machines de revêtement thermique.

Un traitement hydrogène est ensuite déclenché afin de nettoyer les pièces de toutes les impuretés qui remontent en surface durant le traitement thermique. L'hydrogène est généré grâce à un générateur d'hydrogène placé près du four et est également stocké dans des bouteilles au niveau de la zone de stockage près de la citerne d'oxygène.

A la fin du cycle, la température est baissée jusqu'à 80° C ce qui permettra d'ouvrir le four en toute sécurité.

Le traitement thermique permet également de rendre la pièce malléable ce qui facilitera les prochaines étapes de traitements ou maintenance tel que le revêtement thermique, le décapage chimique, etc. et en fin de cycle de maintenance, la pièce subira un autre cycle de chauffage et refroidissement dans le four sous vide afin de retrouver ses caractéristiques originales.

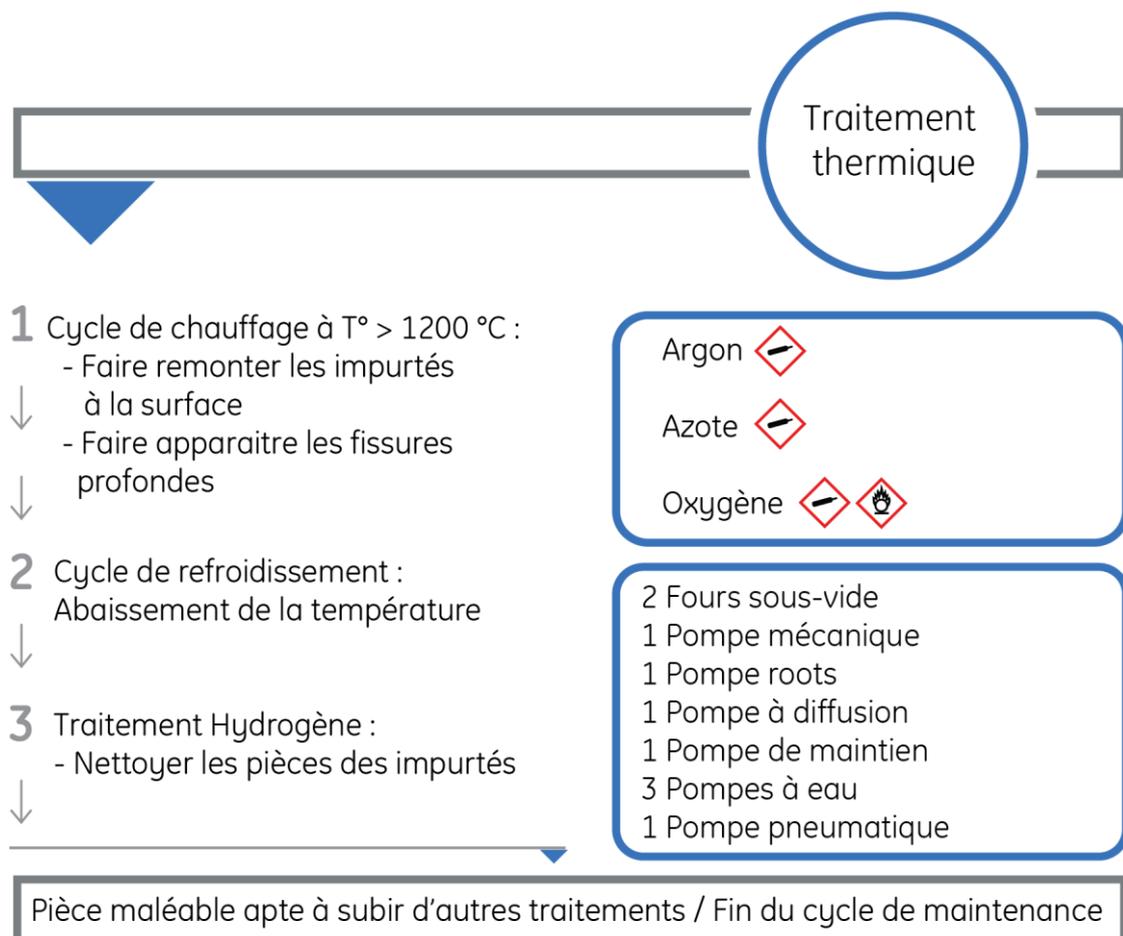


Figure 1.5. Schéma explicatif du processus de traitement thermique

I.2.2. Revêtement thermique (Cabines de coating)



Figure 1.6. Cabines de revêtement thermique

Le revêtement thermique est une opération qui permet d'augmenter la durée de vie d'une pièce durant le cycle de fonctionnement de la turbine sur le site industriel.

Dans les deux cabines de coating, un robot assure le revêtement thermique avec trois procédés différents.

- **Système High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)** : Ce procédé utilise l'oxygène et le kérosène comme combustibles en présence d'une source d'énergie (étincelle d'une bougie), afin d'allumer une flamme dans la chambre de combustion. Cette flamme est orientée par l'action de l'air comprimé vers la sortie d'un pistolet pour brûler une poudre spéciale revêtement à la surface de la pièce.
- **Système plasma (APS)** : L'installation est alimentée en hydrogène, argon et azote à partir de la zone de stockage et d'un générateur d'hydrogène placé près d'une cabine de coating. La flamme s'allume au contact de l'électrode positive avec le *nozzle* (gicleur du pistolet) négatif en créant un court-circuit en présence des gaz à température très élevée. Le robot oriente ensuite la flamme vers la surface de la pièce.

- **Système ARC Aluminium** : Ce procédé est assuré par l'appareil Smart Arc. L'opération consiste à faire passer un fil d'aluminium dans un pôle négatif et un autre dans un pôle positif. Leur rencontre créera un court-circuit qui va permettre de faire fondre l'aluminium. L'aluminium fondu sera projeté à l'aide de l'air comprimé sur la surface de la pièce pour réaliser le revêtement.

Les cabines de coating disposent d'un double système d'aspiration des poussières, afin de les vider des poussières spéciales « revêtement » qui s'avèrent être cancérigènes.

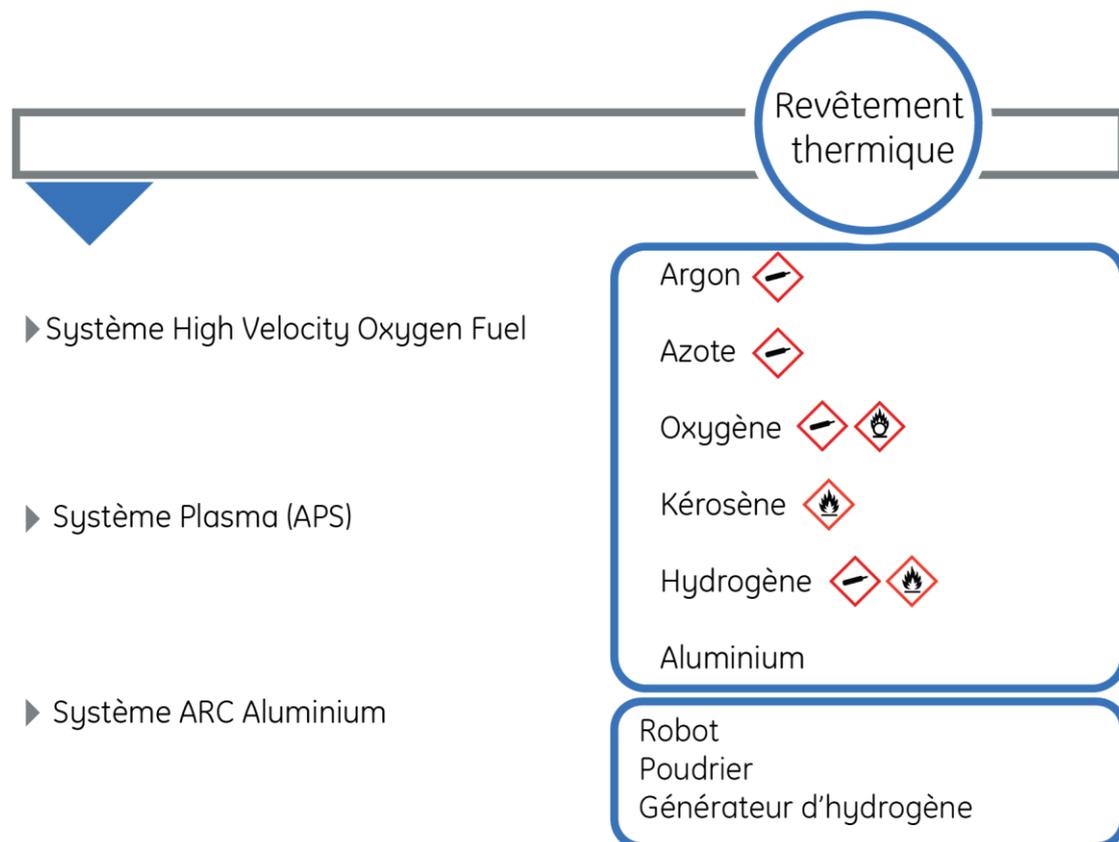


Figure 1.7. Schéma explicatif du processus de revêtement thermique

I.3. Généralités sur les effets dominos

Les accidents majeurs les plus destructeurs sont ceux où il se produit un "effet domino", provoquant l'escalade d'un accident et la propagation de cet événement primaire pouvant éventuellement impliquer de multiples équipements et unités de production.

Les installations ou équipements industriels sont dans la majorité des cas regroupés dans un même espace, ce qui implique une interaction entre eux et un danger encore plus grand pour les infrastructures faisant partie de leur zone d'implantation et pour eux-mêmes.

Du point de vue de la sécurité des installations industrielles, l'étude des effets dominos est très complexe à cause de la nécessité de prendre en considération le fonctionnement de l'ensemble du système et non le fonctionnement de ses parties individuellement. De ce fait, plusieurs paramètres et données d'entrées doivent être pris en compte : La quantité de substances présentes et leurs propriétés physico-chimiques, les conditions spécifiques du procédé, les distances entre les équipements ou les installations, les conditions météorologiques, etc.

I.3.1. Définition et caractéristiques des accidents à effet domino

L'**effet domino** tel que l'ont défini Genserik Reniers et Valerio Cozzani dans leur ouvrage "Domino Effects in the Process Industries-Modelling, Prevention and Managing" paru en 2013 (ref) est : « la propagation spatiale ou temporelle d'un événement primaire provoquant d'autres événements secondaires ». Par conséquent, l'**accident domino** est l'accident dans lequel un événement indésirable primaire se propage temporellement (dans un équipement) ou/et spatialement (à l'équipement voisin), séquentiellement ou simultanément, déclenchant éventuellement d'autres événements indésirables d'ordre supérieur et entraînant des conséquences plus graves que celles de l'événement primaire.

La propagation peut être simple, c'est-à-dire le scénario primaire déclenche un scénario secondaire unique. En général, une propagation simple à plusieurs niveaux donne **une chaîne domino** ; un premier scénario d'accident déclenche un deuxième scénario d'accident, le deuxième scénario d'accident déclenche un troisième scénario d'accident, et ainsi de suite.

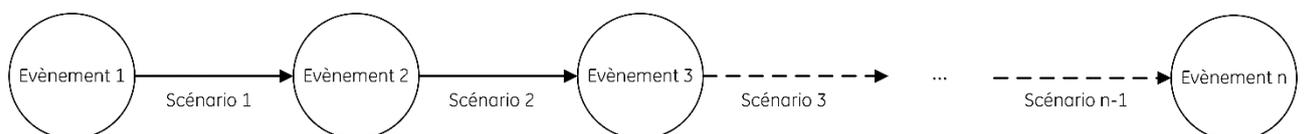


Figure 1.8. Schéma explicatif d'une chaîne domino

Dans le cas où l'accident primaire est grave, la propagation peut donner lieu à plusieurs scénarios secondaires simultanés. Ces derniers vont déclencher à leur tour plus d'un scénario ce qui va générer **une propagation parallèle complexe** à plusieurs niveaux.

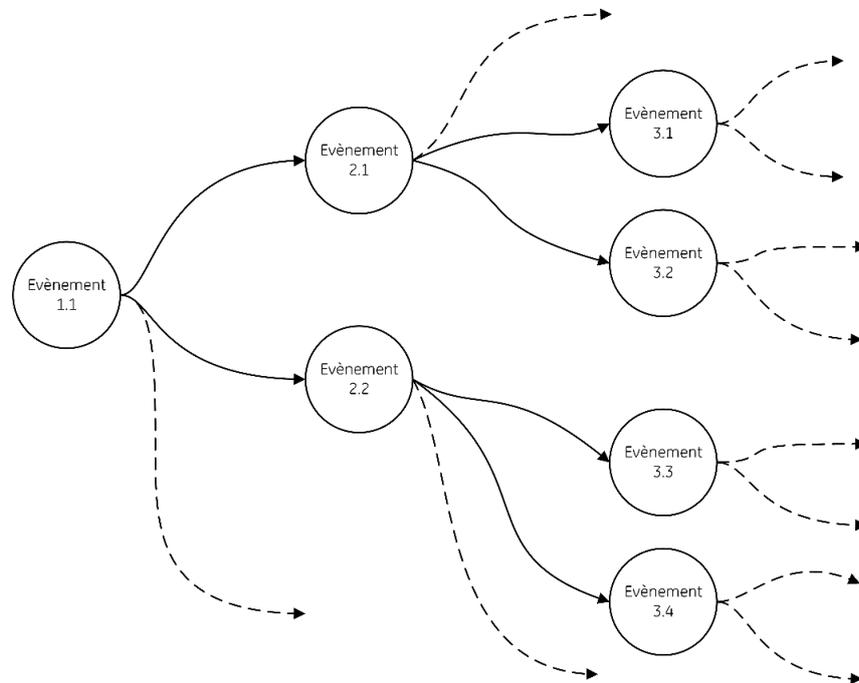


Figure 1.9. Schéma explicatif d'une propagation parallèle complexe

L'identification de la cause de propagation de l'évènement primaire est nécessaire pour mieux décrire le scénario d'accident domino. Elle doit être également identifiée pour tous les autres évènements de la chaîne domino simple ou parallèle complexe. [5] [6]

Mais la propagation seule n'est pas suffisante pour décrire le phénomène des accidents dominos et ne justifie pas la prise en compte des accidents qui suivent le scénario primaire en tant qu'accidents dominos.

Ceci permet de définir la notion de **vecteur d'escalade**, qui est un élément fondamental dans l'étude des accidents dominos. Il est indispensable afin de considérer les scénarios d'accidents comme des scénarios dominos. En effet, afin d'obtenir un accident à effet domino il est impératif que les conséquences globales de cet accident soient plus graves que celles du scénario primaire pris seul.

De ce fait, la propagation et l'escalade des scénarios primaires sont obligatoirement associés pour définir l'accident domino.

Il existe deux types d'escalade :

- L'escalade directe : causée par les dommages directs des unités cibles par effet de rayonnement, surpression, ondes de choc ou projection de fragments.
- L'escalade indirecte : causée généralement par la perte de contrôle de l'installation à cause de la destruction de la salle de contrôle ou l'évacuation du personnel.

Les cibles dans les accidents dominos sont les installations qui ont le potentiel, si elles sont endommagées, de déclencher un scénario secondaire.

Afin de simplifier les évènements dominos et faire lever l'ambiguïté par rapport aux caractéristiques de ces accidents, ils ont été classés en 4 catégories comme le montre le tableau 1.1. [6]

Tableau 1.1 Les différentes catégories d'évènements dominos

Catégorie de l'évènement domino	Sous-catégorie	Définition
1	Interne	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'évènement domino sont situés à l'intérieur de la même zone.
	Externe	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'évènement domino ne sont pas situés à l'intérieur de la même zone.
2	Direct	L'évènement domino est la conséquence directe de l'évènement précédent.
	Indirect	L'évènement domino n'est pas une conséquence directe de l'évènement qui le précède.
3	Temporel	L'évènement domino se produit dans le même équipement (ou installation) que l'évènement précédent, mais avec un retard.
	Spatiale	L'évènement domino se produit à l'extérieur de l'équipement où l'évènement précédent a eu lieu
4	En série	L'évènement domino se produit comme une seule chaîne d'accidents.
	En parallèle	L'évènement domino se produit sous la forme de plusieurs chaînes d'accidents.

Le danger dû aux effets dominos est bien connu et pris en compte dans les normes de sécurité et de la législation.

En effet, en Europe le risque d'effet domino est reconnu dans la législation depuis la première directive Seveso (directive 82/501/CEE), qui exigeait l'évaluation des risques à effet domino dans toutes les installations et l'obligation d'établir un rapport de sécurité, qui a été ensuite remplacé en 2012 par l'article 9 de la directive Seveso-III (directive 2012/18/UE), consacrée aux effets dominos.

La directive Seveso-I exigeait une évaluation complète de la sécurité sur les sites et la nécessité d'évaluer la possibilité d'accidents domino était déjà citée, bien qu'aucune approche technique ou outil spécifique n'existaient à l'époque pour permettre l'identification et l'évaluation de tels scénarios. Mais après la catastrophe de Mexico en 1984 (voir Annexe I), probablement l'un des accidents à effet dominos les plus connus, des préoccupations spécifiques sur le risque d'escalade ont été suscitées. Dès lors, la démonstration de la gravité potentielle des accidents impliquant des effets dominos a conduit à des efforts importants pour la prévention des scénarios d'accidents dominos et les normes ainsi que la législation relative à la maîtrise des risques d'accidents majeurs comprennent désormais des mesures d'évaluation, de contrôle et de prévention des effets dominos.

En effet, plusieurs normes introduisent des mesures préventives, telles que les distances de sécurité ou l'isolation thermique, afin de contrôler et de réduire la probabilité d'événements dominos.

Cependant, les modèles d'évaluation des effets dominos exigent un niveau élevé de détail en ce qui concerne les données d'entrée. C'est la raison, en combinaison des probabilités extrêmement faibles de tels accidents, qui conduit souvent à laisser de côté l'évaluation de la sécurité des activités industrielles, l'évaluation quantitative et la gestion des risques dus aux scénarios dominos.

Des événements récents comme ceux liés au Tsunami de Tohoku au Japon en 2011, qui a engendré l'accident nucléaire de Fukushima, exigent des praticiens de la sécurité, la nécessité de prévenir, modéliser et gérer explicitement les risques dus à des événements à fort impact et à faible probabilité comme les scénarios domino. Ainsi, l'évaluation et la gestion des risques dus aux scénarios dominos, ainsi que la recherche académique et industrielle sur les effets dominos, sont des sujets de plus en plus prioritaires. [7]

I.4. Problématique et objectifs de l'étude

La concentration de process à haut risque au sein d'ALGESCO peut entraîner des accidents ayant un impact simultané sur plusieurs unités du centre de maintenance, entraînant

des pertes humaines, une contamination de l'environnement, d'énormes dommages matériels ainsi que d'importantes conséquences financières et cela à travers les accidents à effet domino.

Des études de danger ont déjà été réalisées par le passé mais jamais la possibilité de tels accidents n'a été envisagée. C'est pour cela que l'entreprise suggère un recensement de tous les scénarios à effet domino crédibles, afin de juger si elle est en mesure d'y faire face et également trouver un moyen pour optimiser la surveillance des paramètres critiques des équipements car un manque de communication entre les différents process a été observé ce qui pourrait amener à des accidents du fait de la proximité des équipements et du grand risque qui entoure chacun d'entre eux.

Cette étude devra donc répondre à la question : « ALGESCO peut-elle faire face à des accidents à effet domino ? Et quel moyen optimiserait la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque ? ».

Pour répondre à cette problématique et atteindre les objectifs qui sont :

- L'étude des accidents à effets dominos engendrés par les process à haut risque d'ALGESCO.
- L'optimisation du service d'intervention d'ALGESCO et de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque.

Une méthodologie de travail a été arrêtée et sera expliquée dans le titre suivant.

I.5. Méthodologie

Afin de répondre à la problématique posée par BHGE et atteindre l'ensemble des objectifs fixés, la méthodologie appliquée pour cette étude se décline en deux axes.

Le premier axe concerne l'étude des effets dominos et est divisé en trois parties :

Partie 1 : Détermination de la zone d'étude

A la suite cette partie, les process à haut risque du centre de maintenance d'ALGESCO sont définis et le périmètre de l'étude est fixé.

En effet, la détermination des process et équipements susceptibles d'être endommagés par les vecteurs d'escalade générés par les scénarios accidentels primaires, est le point de départ de l'évaluation du risque d'accidents à effet domino.

Partie 2 : Détermination des événements primaires

En s'appuyant sur les études de risque déjà réalisées au sein d'ALGESCO pour chaque process jugé critique, les événements primaires susceptibles d'engendrer une séquence domino sont déterminés.

Partie 3 : Application de la méthode QRA pour l'étude des effets dominos et simulation des effets

La méthode préconisée et retenue pour l'étude des effets dominos au niveau d'ALGESCO est la méthode QRA « Quantitative Risk Assessment ». En effet, elle permet l'évaluation quantitative des accidents à effets dominos, par le calcul des indices de risque, et cela en s'appuyant sur des outils et logiciels FDS (Fire Dynamics Simulator) ainsi que l'analyse Bayésienne, pour évaluer la fréquence des scénarios dominos.

Les logiciels utilisés pour l'étude sont PHAST® PyroSim® et ANSYS STRUCTURAL®.

La méthode se décline en plusieurs étapes, schématisées dans la figure 1.10.

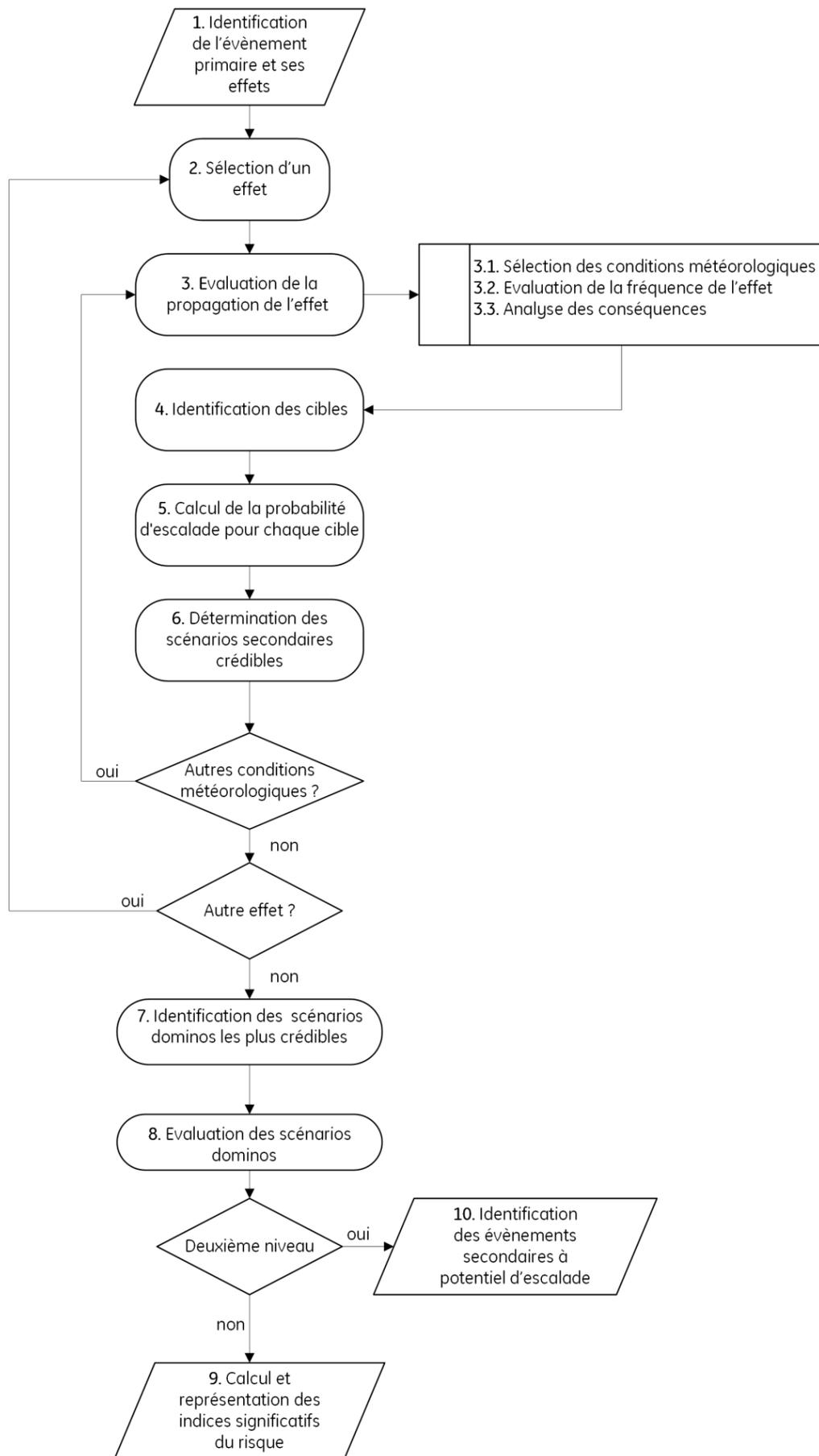


Figure 1.10. Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos [1]

Des suites de l'évaluation quantitative des risques, la séquence la plus critique est mise en évidence.

Le second axe de l'étude concerne l'optimisation du service d'intervention d'ALGESCO et de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque.

En premier lieu, à travers l'évaluation du système d'intervention actuel, afin de déterminer si l'entreprise est en mesure de faire face aux accidents majeurs et plus précisément ceux à effet domino. Par la suite, un modèle d'évacuation du personnel en cas de sinistre sera proposé en s'appuyant sur le logiciel Pathfinder®.

En deuxième lieu, à travers la programmation d'un prototype de tableau de bord digital connecté.

En suivant les différentes étapes de ces deux axes, des réponses à la problématique posée seront apportées.

Conclusion

Après une brève présentation de l'entreprise, ce chapitre a permis une mise en contexte concernant l'étude des effets dominos et la définition de toute la terminologie qui l'entoure et qui se révèle être indispensable pour la suite de l'étude, ainsi que la description des processus de revêtement et de traitement thermique, considérés comme étant à haut risque.

A la fin de ce chapitre, la problématique de l'étude et la méthodologie à suivre afin d'atteindre les objectifs fixés par l'entreprise ont été défini et qui sont, en l'occurrence, l'étude des effets dominos des process à haut risque ainsi que l'optimisation du service d'intervention et de la surveillance des paramètres critique des process.

La première étape de l'étude consiste en l'application de la méthode QRA pour les effets dominos et qui fera donc l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Analyse des risques par la méthode QRA pour les effets dominos

II. Analyse des risques par la méthode QRA pour les effets dominos

Introduction

Ce chapitre représente le cœur de notre étude sur les effets dominos. Nous déterminerons la zone d'étude, qui est une étape indispensable pour encadrer notre travail puis, après une partie théorique qui apportera les éléments nécessaires à la compréhension de toute la méthodologie de la QRA, nous identifierons les événements primaires susceptibles de donner lieu à des accidents dominos et qui représentent le point de départ de l'application de la QRA.

II.1. Détermination de la zone d'étude

Comme il a été mentionné dans la section I.3.1, l'étude des effets dominos nécessite la prise en compte de l'ensemble des éléments du système étudié. Ainsi, la zone d'étude doit être bien définie avant d'appliquer la QRA pour les effets dominos.

Cette étape, essentielle et très importante dans l'identification des cibles susceptibles de déclencher un scénario secondaire, consiste à déterminer les équipements ou les unités constituant la zone d'étude, leurs emplacements les uns par rapport aux autres et les distances qui les séparent.

La zone étudiée est celle des processus à haut risque. Elle est constituée de 2 fours sous vide, 2 cabines de revêtement thermique et le tout est relié aux réservoirs de stockage des gaz par des pipes **en aciers** d'un **diamètre de 5cm**. La zone de stockage, située à l'extérieur de l'atelier, contient :

- 03 citernes d'argon, une d'une capacité de 10530 m³ (Linde Gaz) et deux autres d'une capacité de 15800 m³ chacune, qui alimentent les fours sous vide.
- 03 citernes d'azote, une d'une capacité de 10530 m³ (Linde Gaz) et deux autres d'une capacité de 15800 m³ chacune, qui alimentent les fours sous vide.
- 01 citerne d'oxygène (Lind Gaz), dont la capacité est de 10530 m³.
- 02 racks de stockage d'hydrogène dont chacun contient 12 bouteilles d'une capacité de 5 L chacune.

La figure 2.1 montre l'emplacement de la zone d'étude dans le centre de maintenance d'ALGESCO. La légende et le reste de l'atelier sont masqués pour des raisons de confidentialité.

La figure 2.2 quant à elle montre l'aménagement et les distances entre les unités constituant la zone étudiée.

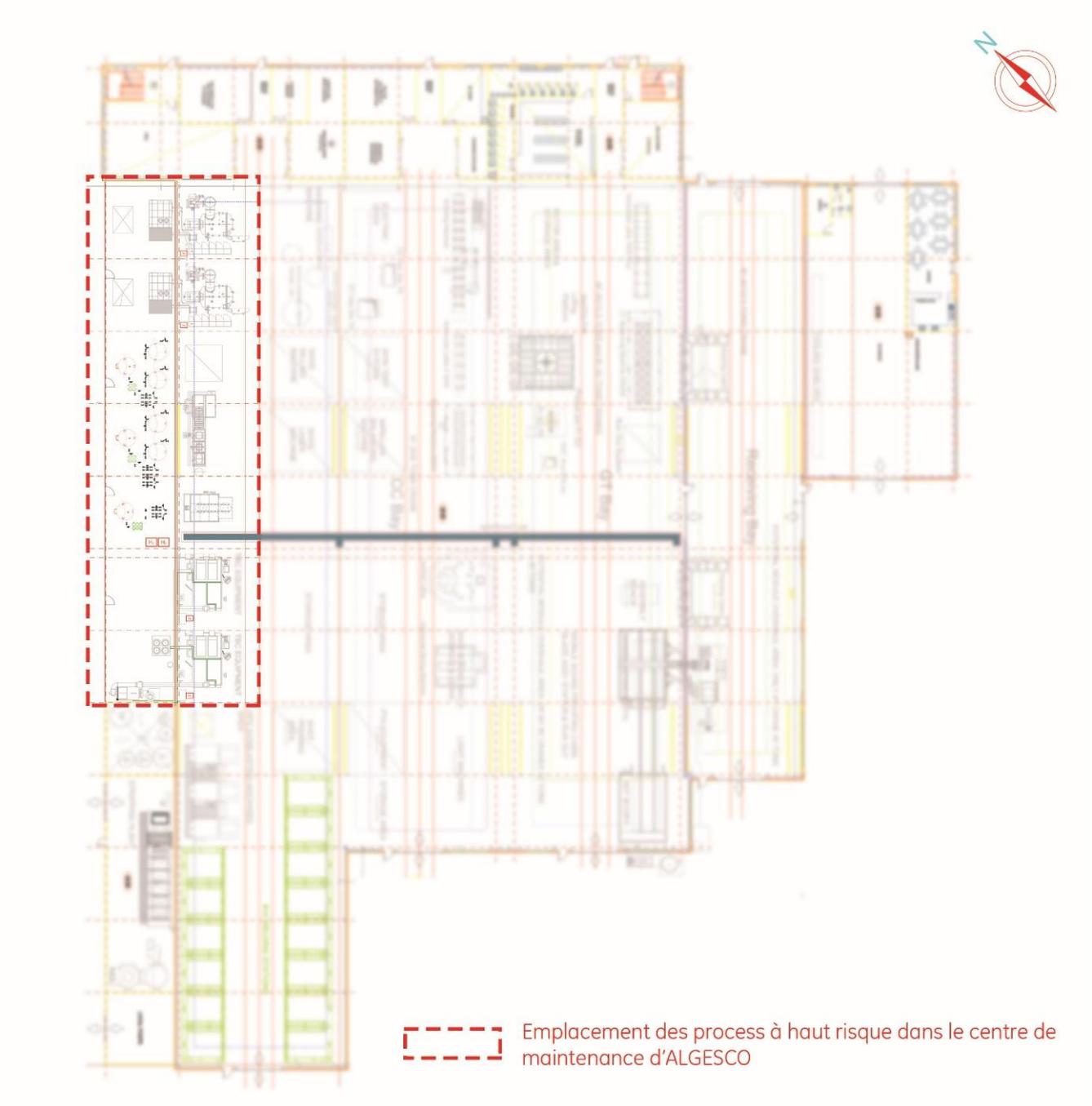


Figure 2.1 Emplacement des process à haut risque au niveau du centre de maintenance d'ALGESCO

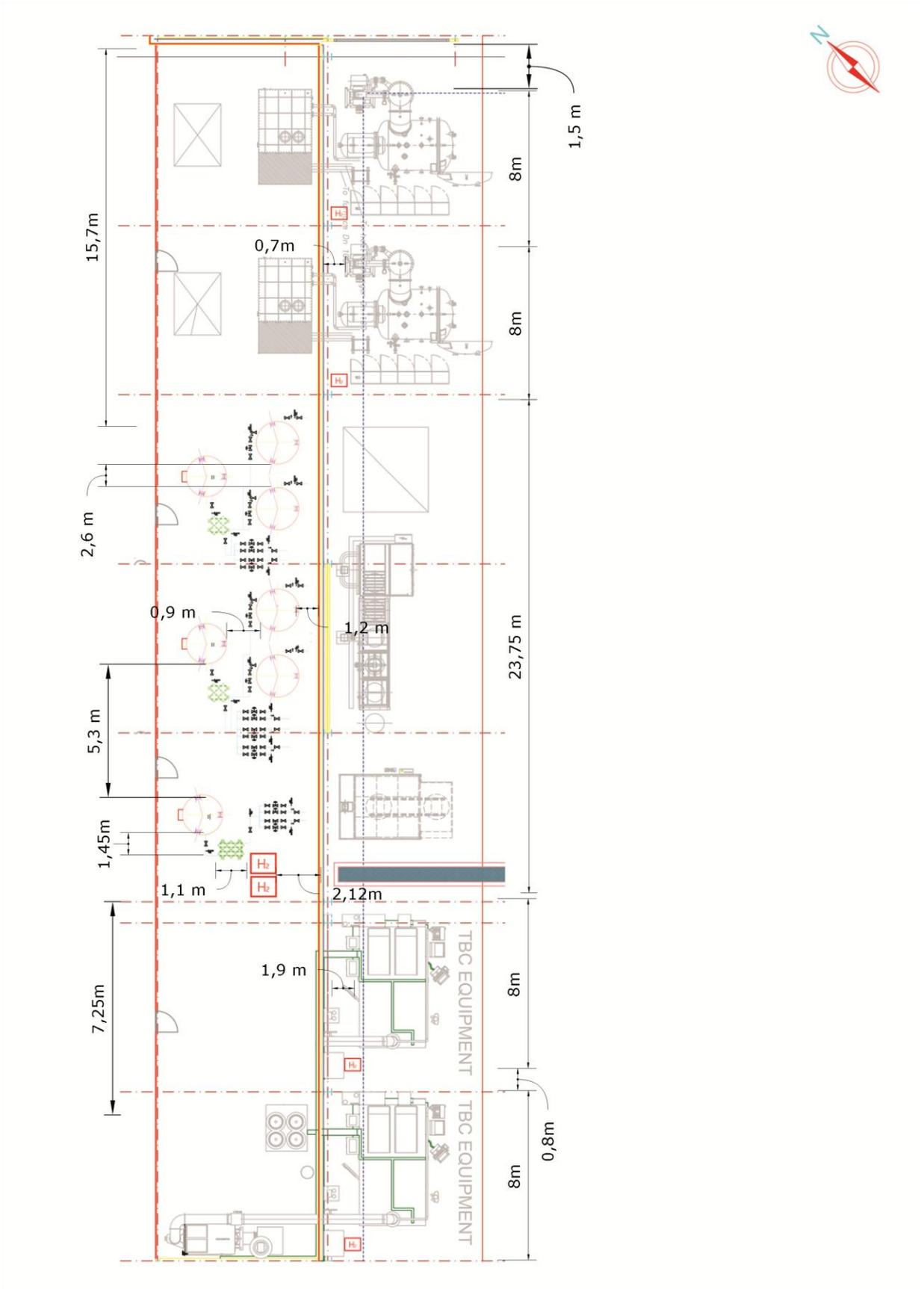


Figure 2.2 Aménagement et distances séparant les différentes unités dont est constituée la zone étudiée.

II.2. Présentation de la méthode QRA

Dans l'évaluation des risques des installations industrielles, la méthode QRA vise à calculer le risque, exprimé par des indices, tels que le risque individuel et le risque sociétal. L'approche générale de la QRA est inchangée depuis son élaboration au début des années 1980, la méthode a certes été affinée et est aujourd'hui plus détaillée. Elle est basée sur de meilleurs modèles mathématiques, d'une plus grande précision.

Elle représente l'outil le plus utilisé pour fournir des informations quantitatives sur les risques posés par les installations. Elle est devenue essentielle pour le développement, l'exploitation continue et l'expansion des installations qui répondent aux attentes croissantes de la société en matière de sécurité. Même s'il est évident que cette évaluation n'est pas une description exacte de la réalité, elle reste le meilleur outil analytique prédictif disponible à ce jour pour évaluer les risques des installations complexes de processus et de stockage.

Par ailleurs, dans le passé, l'application de la méthode QRA sur les effets dominos était limitée du fait de la non-disponibilité des ressources informatiques nécessaires en plus des informations d'implantation et des conditions météorologiques (la direction du vent par exemple) qui jouent un rôle extrêmement important dans la détermination de la probabilité d'escalade. Mais au cours des dernières années, des méthodes et des modèles ont été développés afin de permettre l'évaluation quantitative des accidents à effets dominos dans le cadre de la QRA, appuyés par des outils et logiciels FDS (Fire Dynamics Simulator) ainsi que l'analyse Bayésienne et les fonctions probit, pour évaluer la fréquence des scénarios dominos [1].

Dans ce qui suit, ces méthodes et outils d'évaluation quantitative des effets dominos seront appliquées à travers le cas d'ALGESCO et de son site de maintenance de turbomachines.

La figure 2.3 illustre les différentes étapes de la QRA, qui seront détaillées dans ce qui suit.

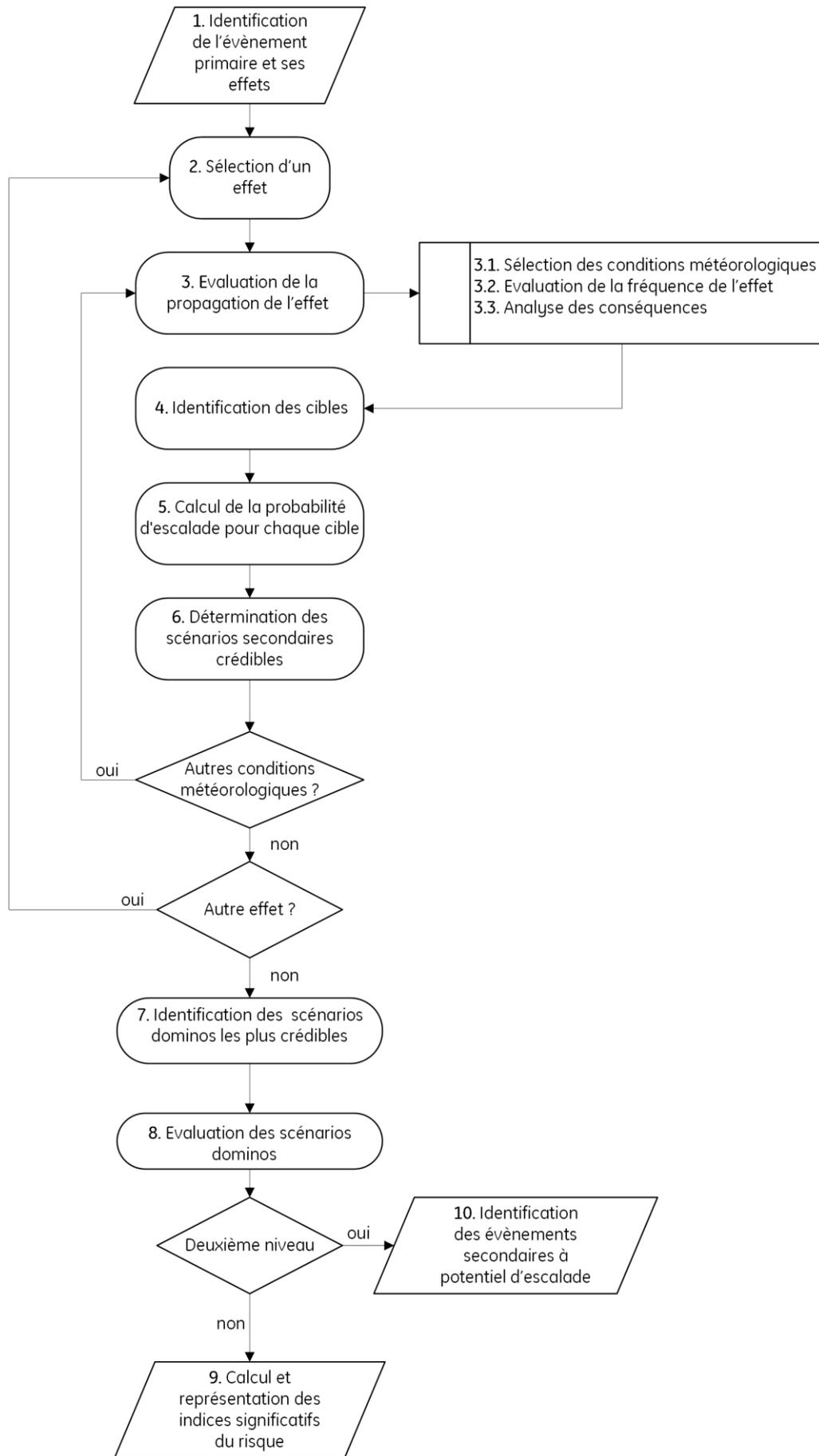


Figure 2.3. Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos [1]

II.2.1. Explication des différentes étapes de la QRA

II.2.1.1. Identification des évènements primaires

La première étape de la QRA pour les effets dominos consiste à déterminer les évènements indésirables qui peuvent être considérés comme le point de départ de l'enchaînement des accidents et qui ont le potentiel de générer de seconds évènements indésirables, voir des tiers. Ces évènements ne sont autres que les phénomènes dangereux retirés des études et analyses de risque antérieures réalisées sur le site.

II.2.1.2. Sélection d'un effet

La propagation ainsi que l'escalade des scénarios primaires dépendent essentiellement des effets générés par l'évènement primaire. De ce fait, les effets de chaque phénomène dangereux doivent être déterminés et évalués.

Les effets qui seront pris en compte et évalués sont : la radiation thermique, la surpression et la projection des fragments.

Comme le montre la figure 2.3, chaque effet sera sélectionné et étudié seul pour évaluer l'intensité du vecteur d'escalade, sa fréquence et ses conséquences.

II.2.1.3. Evaluation de la propagation

i. Sélection des conditions météorologiques

La première étape de l'évaluation de la propagation consiste à déterminer les conditions météorologiques.

Ces dernières ont un impact direct sur le développement de certains phénomènes dangereux. En effet, le vent (sa vitesse et sa direction) ainsi que la température sont des variables qui affectent la longueur des flammes, la propagation des incendies, la dispersion des gaz toxiques, etc., d'où l'importance de la prise en compte de leur variation surtout dans l'étude des effets dominos, où elles impacte sur la probabilité d'escalade.

ii. Evaluation de l'effet et sa fréquence

Le calcul de la fréquence de l'effet revient à déterminer la fréquence d'occurrence de l'évènement primaire [8]. Elle est donnée par la relation :

$$F_{ep} = F_{erc} \times P_1 \quad (2.1)$$

F_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement primaire (ans^{-1}).

F_{erc} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement redouté central (ans^{-1}).

P_1 : Probabilité du scénario primaire.

iii. Evaluation des conséquences

L'évaluation des conséquences dépend essentiellement des effets mentionnés précédemment dans la section II.2.1.2.

Les valeurs de radiation thermique et surpression sont obtenues par des simulations appropriées pour chaque cas étudié. A cet égard, trois logiciels sont utilisés :

- ANSYS STRUCTURAL ® : pour la simulation des effets de surpression par l'application de la dynamique explicite. (Voir annexe II)
- PyroSim® : pour la simulation des effets de radiation thermique. (Voir annexe III)
- PHAST® : pour la simulation des effets de surpression.

Les simulations permettront entre autres, l'élaboration d'une carte des effets physiques mais également, grâce à la comparaison des valeurs obtenues par rapport aux seuils d'escalade, à évaluer les vecteurs d'escalade et déduire s'il y aura propagation des effets ou non.

Ces mêmes valeurs seront ensuite comparées aux seuils limites pour les personnes et les structures afin d'estimer la gravité de l'accident à effet domino à travers le calcul des indices de risques développés plus tard dans la section II.2.1.10.

Les seuils des effets de radiation thermique sur l'homme, référencés dans la littérature, sont représentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Seuils des effets de radiation thermique sur l'Homme [9]

Types d'effets constatés		flux radiatifs (kW.m^{-2})
Durée du phénomène > 2min	Létaux	5
	Irréversibles	3
Durée du phénomène < 2 min	Létaux (100 %)	6000-7000
	Brûlures du 3ème degré superficielles	2600
	Létaux (50 %)	2200 2000

	Brûlures du 2nd degré sévères	1200
	Létaux (1 %)	1000
	Irréversibles	600
	Brûlures superficielles du 2nd degré	700
	Brûlures du 1er degré	200
	Seuil de douleur	85

Les seuils des effets de radiation thermique sur les structures, référencées dans la littérature, sont représentés dans le tableau 2.2

Tableau 2.2. Seuils des effets de radiation thermique sur les structures [9]

Dégâts constatés	Flux de radiation thermique (kW.m ⁻²)
Bris de vitres	5
Apparitions d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles en présence d'une source d'ignition	10
Limite de tenue des structures pour une exposition prolongée, hors structure béton	16
Tenue du béton pendant plusieurs heures	20
Auto-inflammation du bois	35
Propagation du feu à des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, même refroidis	> 36
Rupture ou destruction des éléments en acier	100
Ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200

Les seuils des effets de surpression sur, référencés dans la littérature, sont représentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Seuils des effets de surpression sur l'Homme [9]

Types d'effet constaté	Surpression (mbar)
Effets irréversibles indirects	20
Effets Irréversibles directs	50
Effets létaux indirects	150
Détérioration des tympanes	340
Effets létaux directs	1000

Les seuils des effets de surpression sur les structures, référencées dans la littérature, sont représentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Seuils des effets de surpression sur les structures [9]

Dégâts constatés	Surpression (mbar)
Destruction de 10% des vitres	20
Dégâts légers aux structures et destruction de 75% des vitres	50
Destruction totale des vitres et démolition partielle des structures	70
Dommages mineurs aux structures métalliques	100
Effondrement partiel des murs	140
Limite inférieure des dégâts graves aux structures	160
Destruction de 50% des murs en brique ou parpaing	170
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage, rupture des structures autoporteuses industrielles	250
Rupture de canalisation, destruction des poteaux	350
Renversement des wagons chargés, destructions des murs en brique d'une épaisseur de 20 à 30 cm	500
Destruction des murs en béton armé, dommages graves des machines situées dans les bâtiments industriels.	700
Destructions totale des structures	830

II.2.1.4. Identification des cibles

L'analyse des conséquences des événements primaires sera suivie par l'identification des cibles domino crédibles déterminées par l'utilisation des **seuils d'escalade**.

Ces seuils d'escalade représentent les valeurs des effets physiques au-dessus desquelles l'escalade d'un scénario primaire a lieu, en raison des dommages causés à une unité secondaire et du potentiel d'escalade des scénarios secondaires qui peuvent en résulter.

Ainsi, tenant compte de la carte des effets physiques des scénarios primaires élaborés dans l'étape précédente, tous les équipements situés à l'intérieur des zones où l'effet physique dépasse les valeurs seuils d'escalade, sont considérés comme cible.

Le tableau 2.5 représente les vecteurs d'escalade pour les différents types d'équipements et les valeurs seuils de ces derniers (Cozzani et al., 2006), pour les incendies et les explosions.

Tableau 2.5 Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique

Vecteur d'escalade	Equipement cible	Seuil d'escalade
Radiation thermique	Atmosphérique	15 kW.m ⁻² durant 10 min
	Pressurisé	50 kW.m ⁻² durant 10 min
Surpression	Atmosphérique	22 kPa
	Pressurisé	17 kPa
	Allongé (toxique)	16 kPa
	Allongé (inflammable)	31 kPa
	Auxiliaire (toxique)	37 kPa
	Auxiliaire (inflammable)	Non disponible dans la littérature

II.2.1.5. Calcul de la probabilité d'escalade pour chaque cible

Pour l'estimation de la probabilité d'escalade, l'équation (2.2) proposée par (Mingguang et Juncheng, 2008) sera utilisée.

$$P_{i,j} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{i,j} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad (2.2)$$

$P_{i,j}$: Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i

$Y_{i,j}$: Fonction probit.

Par la suite, il sera possible de calculer la fréquence de l'effet domino, en utilisant l'équation 2.3. Elle sera ensuite utilisée pour le calcul des indices de risques.

$$F_{ed} = F_{ep} \times P_{i,j} \quad (2.3)$$

F_{ed} : Fréquence d'occurrence annuelle de la séquence domino (installation j impactée suite à un accident dans i) (ans⁻¹).

F_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'accident primaire (ans⁻¹).

Comme le montre l'Eq. (2.2), la détermination de la probabilité d'escalade se fait moyennant des modèles de vulnérabilité, qui utilisent des fonctions probit.

- **Définition d'une fonction probit**

La fonction probit Y est définie comme étant la réciproque de la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. [10]

$$\Phi^{-1} :]0, 1[\rightarrow \mathbb{R}$$

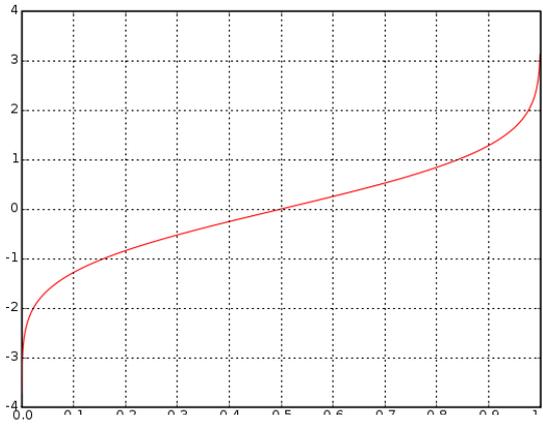


Figure 2.4 Fonction probit (Φ^{-1})

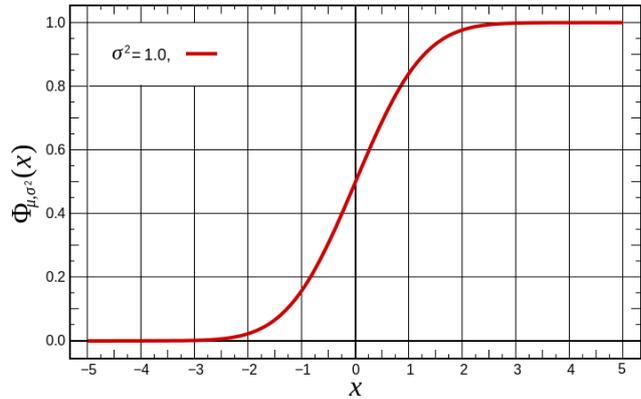


Figure 2.5 Fonction de répartition loi normale centrée réduite (Φ)

Afin de démontrer d'où l'expression des fonctions probit a été déduite, l'hypothèse suivante a été établie :

Y est une variable aléatoire avec une moyenne de 5 et une variance de 1. (Eisenberg et al., 1975). Pour un facteur d'endommagement ou de blessure X qui correspond à la distribution log-normale : $X \rightarrow \log N(\mu, \sigma^2)$

La fonction probit s'écrit plus communément sous la forme:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(x) \quad (2.4)$$

Il existe une relation qui relie la probabilité P à la fonction probit Y et qui est donnée par l'Eq. 2.5.

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.5)$$

La détermination d'une équation du type général donné par l'Eq. (2.4) est facilement démontrée en considérant d'abord une distribution normale :

Soit X une variable aléatoire qui suit la loi normale de paramètre μ et σ^2

$$X \rightarrow \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$$

Définie par sa fonction densité f

$$f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

Et sa fonction de répartition F

$$F = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.7)$$

En sachant que la fonction de répartition dans le cas continue est égale à la probabilité, c'est-à-dire : $F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$

$$\Rightarrow P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.8)$$

L'égalité entre les équations (2.5) et (2.8) nous donne :

$$\begin{cases} Y - 5 = x = u \\ \frac{x - \mu}{\sigma} = u \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow Y &= \frac{x - \mu}{\sigma} + 5 \\ &= \left(5 - \frac{\mu}{\sigma}\right) + \frac{1}{\sigma} x \end{aligned}$$

$$Y = k_1' + k_2' x \quad (2.9)$$

Avec

$$\begin{cases} k_1' = 5 - \frac{\mu}{\sigma} \\ k_2' = \frac{1}{\sigma} \end{cases}$$

Même chose pour la distribution log-normale:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(x) \quad (2.10)$$

Avec

$$\begin{cases} k_1 = 5 - \frac{\mu'}{\sigma} \\ k_2 = \frac{1}{\sigma} \end{cases}$$

L'équation (2.10) est la forme la plus généralement utilisée pour la fonction probit.

L'approche probit est utilisée pour l'évaluation quantitative des risques à effet dominos dus à la surpression et à la radiation thermique. Les modèles probit ne dépendant pas des valeurs seuils de dommage, ils peuvent donc facilement être modifiés pour tenir compte des catégories spécifiques d'équipements. Par conséquent, l'analyse des probits a été appliquée à la fois pour réviser les modèles existants et pour développer davantage les modèles probabilistes pour les dommages causés à des catégories spécifiques d'équipements.

- **Application des fonctions probit dans l'évaluation de l'impact des effets physiques**

En 1975, Eisenberg et ses collaborateurs ont d'abord utilisé un modèle simplifié pour évaluer la probabilité de blessures pour l'être humain et les dommages causés aux équipements par les effets de surpression et de radiation.

Les auteurs ont ensuite défini des fonctions probit pour relier les dommages causés à l'équipement par la surpression statique de pointe ΔP° .

$$Y = k_1 + k_2 \ln(\Delta P^\circ) \quad (2.11)$$

Le modèle d'Eisenberg et ses collaborateurs était basé sur l'évaluation expérimentale du déplacement de l'équipement avec la déformation et la rupture subséquente des connexions, ne tenant pas compte de la défaillance catastrophique directe de l'équipement.

Les résultats obtenus sont:

$$\begin{cases} k_1 = -23.8 \\ k_2 = 2.92 \end{cases}$$

L'approche probit a ensuite été suivie par d'autres auteurs (voir par exemple Khan et Abbasi, 1998), qui ont proposé une fonction probit similaire à l'équation d'Eisenberg, mais

substituant la surpression statique à la pression totale (la somme de la pression statique et dynamique). Khan et Abbasi donnent les mêmes coefficients de probit d'Eisenberg, ce qui est compréhensible car, la pression dynamique est négligeable pour la plupart des explosions industrielles.

Plus récemment, Cozzani et Salzano (2005) ont élaboré un ensemble étendu de données concernant l'explosion dans le milieu de l'industrie que Zhang et Jiang ont affiné en 2008 pour faire ressortir des fonctions probit pour les effets de radiation thermique et de surpression au niveau de différents types d'équipements.

Ainsi, des fonctions différentes sont utilisées selon l'effet physique et le type d'équipement étudiés. Une étude récente (Sun et al. 2013) montre la validité et la rationalité des modèles probit pour l'étude des effets dominos causés par des ondes de surpression dans l'industrie chimique. Concernant l'effet des radiations thermiques, la fiabilité des modèles de calcul de probabilité d'escalade présentés, a été démontrée lors de leur application à plusieurs cas d'études, notamment elle réalisée par (Landucci et al. 2012)

Les modèles proposés par Zhang et Jiang reconnus comme étant les plus fiables, seront donc utilisés pour la suite de notre étude. En effet, ce qui importe dans l'étude des effets dominos, c'est l'évaluation de la propagation au niveau des équipements et donc la vulnérabilité de ces derniers et non la vulnérabilité de l'Homme par rapport aux effets physiques. Les modèles retenus sont présentés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 Modèles de vulnérabilité

Effets physiques	Equipements cibles	Modèles de vulnérabilité
Radiation thermique	Atmosphérique	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{tff})$ $\ln(\text{tff}) = -1.13 \ln(I_{i,j}) - 2.67 \times 10^{-5} V + 9.9$
	Pressurisé	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{tff})$ $\ln(\text{tff}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845 V^{0.032}$
Surpression	Atmosphérique	$Y_{i,j} = -9.36 + 1.43 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Pressurisé	$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Allongé (tour de distillation...)	$Y_{i,j} = -28.07 + 3.16 \times \ln(\Delta P_{i,j})$

Tels que :

i : équipement source de l'accident.

j : équipement cible.

$Y_{i,j}$: fonction probit.

t_{tf} : temps-avant-défaillance (s).

V : volume de l'équipement (m^3).

$I_{i,j}$: intensité des radiations thermique ($kW.m^{-2}$).

$\Delta P_{i,j}$: surpression statique maximale en kPa

Concernant les effets de projection de fragments, du fait qu'aucun modèle de vulnérabilité précis n'existe pour l'estimation des dommages causés sur la cible, seule une estimation qualitative de la propagation peut être obtenue.

II.2.1.6. Détermination des scénarios secondaires crédibles

Après le calcul de la probabilité d'escalade des différentes cibles, vient la détermination des scénarios secondaires crédibles résultant de l'événement primaire.

II.2.1.7. Identification des scénarios dominos les plus crédibles

Afin d'identifier les scénarios dominos les plus crédibles, les réseaux Bayésiens seront d'une grande utilité. En effet, en tirant parti de leur structure graphique flexible, il sera possible de montrer l'ordre séquentiel des événements.

- **Définition d'un réseau bayésien**

Un réseau bayésien est un modèle graphique dans lequel les nœuds représentent des variables et sont reliés par des arcs dirigés (causaux). Les arcs dénotent des dépendances ou des relations de cause à effet entre les nœuds liés, tandis que les probabilités conditionnelles assignées aux nœuds déterminent le type et la force de ces dépendances.

Les nœuds à partir desquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds parents, alors que les nœuds vers lesquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds enfants. Tel que, un nœud peut être simultanément l'enfant d'un nœud et le parent d'un autre nœud.

Les nœuds sans parent et les nœuds sans enfant sont appelés respectivement nœuds racines et nœuds feuilles (Jensen et Nielsen, 2007).

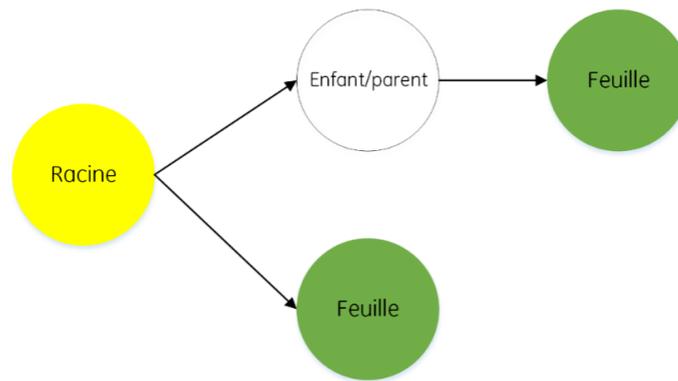


Figure 2.6 Schématisation des composantes d'un réseau Bayésien

Dans le cas de l'étude des effets dominos au niveau d'ALGESCO, la disposition des différentes unités des process sera considérée comme un ensemble de variables ; c'est-à-dire que chaque variable représente une unité ou un élément de l'équipement, selon le niveau de détail de l'analyse.

Un réseau bayésien peut donc être utilisé pour modéliser qualitativement et quantitativement l'influence des unités les unes sur les autres via les arcs causaux et les probabilités conditionnelles, pour estimer la probabilité d'un effet domino à différents niveaux.

Il étend la distribution de probabilité commune d'un ensemble de nœuds liés, par exemple :

$$U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

En d'autres termes, en ne considérant que les dépendances locales, en factorisant la distribution des probabilités communes comme la multiplication des probabilités des nœuds compte tenu de leurs parents immédiats. (Khakzad et al., 2013)

- **Identification des séquences dominos**

Afin de modéliser la propagation probable d'un effet domino, les étapes suivantes sont suivies :

Étape 1: En fonction de la disposition du shop, un nœud sera affecté à chaque unité de process.

Avant d'appliquer la méthode à notre cas d'étude, l'exemple d'une usine de 6 unités (les colonnes de distillation, les réservoirs de stockage atmosphérique, les réservoirs de stockage sous pression, etc.) sera présenté dans ce qui suit.

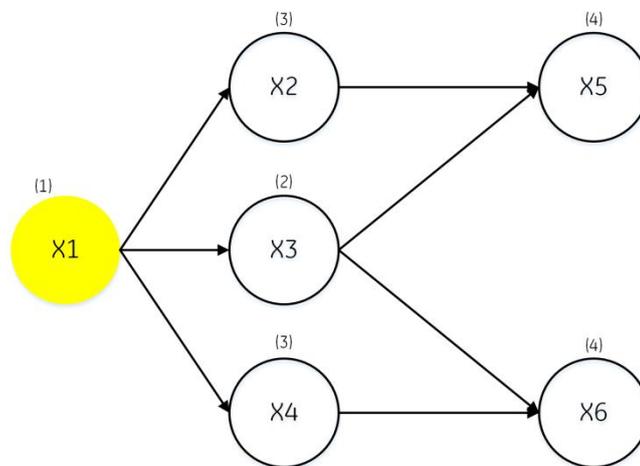


Figure 2.7 Modèle de propagation probable d'un effet domino dans une usine à six unités (X_1 à X_6). Les nombres entre parenthèses indiquent l'ordre séquentiel possible des événements.

Étape 2: Identification de l'unité primaire où l'accident primaire a lieu, dans la figure 2.7 elle est schématisée en jaune (nœud racine).

Étape 3: Une fois les vecteurs d'escalade et les cibles identifiés à l'aide des valeurs seuil d'escalade (comme expliqué dans la section I.2.2.1.4.), les probabilités d'escalade des unités secondaires vont être calculées compte tenu de l'événement primaire, c'est-à-dire $P(X_2/X_1)$, $P(X_3/X_1)$ et $P(X_4/X_1)$. Tel que, les unités ayant la probabilité d'escalade la plus élevée sont choisies comme unités secondaires (par exemple, X_3 dans la figure 2.7).

Puisque les événements secondaires sont causés par l'événement primaire, un arc causal doit être dirigé de X_1 à X_3 , montrant que l'occurrence de X_3 est conditionnelle à l'occurrence de X_1 .

En rappelant que pour le cas d'ALGESCO, la probabilité d'escalade se calcul à l'aide des fonctions probit (voir section I.2.2.1.5.)

Étape 4: En remplaçant l'unité primaire par les unités secondaires, l'étape 3 est répétée pour déterminer les unités tertiaires potentielles (p. ex. X_2 et X_4), les unités quaternaires potentielles (p. ex. X_5 et X_6) et ainsi de suite.

Dans cet exemple, X_2 et X_4 (X_5 et X_6) ont les mêmes probabilités d'escalade et sont tous deux sélectionnés comme unités tertiaires (quaternaires).

Il convient de noter que lorsqu'on répète la même procédure pour les unités secondaires ou les unités d'ordre supérieur, il faut tenir compte des **effets synergiques**.

On entend par effet de synergie que les vecteurs d'escalade des unités nouvellement engagées (d'ordre i) coopèrent avec ceux des unités déjà engagées (d'ordre $i-1$) pour avoir un impact sur les unités d'ordre supérieur (d'ordre $i + 1$) qui n'avaient pas dépassé les critères de seuil dans les niveaux précédents.

Par exemple, dans la figure 2.7, X_2 et X_3 coopèrent entre eux (c'est-à-dire que leurs vecteurs d'escalade sont superposés) pour déclencher un accident dans X_5 .

Ainsi, les arcs causaux doivent être dirigés de X_2 et X_3 vers X_5 , montrant la dépendance conditionnelle de ces derniers par rapport aux premières unités. Par conséquent, lors de l'attribution de la probabilité conditionnelle d'escalade de X_5 due à l'effet synergique, $P(X_5/X_2, X_3)$ est également calculée à l'aide des fonctions probit mais en **sommant les vecteurs d'escalade**.

Une fois le modèle de propagation probable de l'effet domino développé sous la forme d'un réseau bayésien, la probabilité de l'événement primaire et les probabilités conditionnelles des autres événements calculées, la distribution conjointe des probabilités des événements contribuant à l'effet domino, peut être calculée.

Pour l'exemple de la figure 2.7, la distribution de probabilité conjointe des événements qui contribuent à l'effet domino $U = \{X_1, \dots, X_6\}$ est calculée comme suit

$$P(U) = P(X_1)P(X_3/X_1)P(X_2/X_1, X_3)P(X_4/X_1, X_3)P(X_5/X_2, X_3)P(X_6/X_3, X_4) \quad (2.12)$$

Il est à noter qu'en choisissant un autre point de départ plutôt que X_1 , on obtiendrait un réseau bayésien différent et, par conséquent, une distribution de probabilité commune différente de celle montrée dans Eq. (2.12)

En supposant que X_1 est l'unité primaire et selon la figure 2.7, la chronologie ou l'ordre séquentiel probable des événements serait $X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ (ou X_4) $\rightarrow X_5$ (ou X_6).

En connaissant le modèle de propagation d'un effet domino, sa probabilité d'occurrence à différents niveaux peut être estimée. Généralement, la probabilité de l'effet domino est calculée comme la multiplication de la probabilité de l'événement primaire et de la probabilité d'escalade. Pour qu'il y ait un effet domino au premier niveau, il est nécessaire que l'accident dans l'unité primaire se propage dans au moins une des unités secondaires voisines. Par

exemple, sur la figure 2.7, en considérant X_3 comme unité secondaire, la probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être calculée comme suit

$$P_{\text{Niveau1}} = P(X_1)P(X_3/X_1) \quad (2.13)$$

De même, l'effet domino ne pourrait passer au deuxième niveau que si au moins l'une des unités tertiaires X_2 ou X_4 est touchée par l'accident de premier niveau. Par conséquent, la probabilité de l'effet domino de deuxième niveau est calculée comme suit

$$P_{\text{Niveau2}} = P(X_1)P(X_3/X_1)P(X_2 \cup X_4 / X_1, X_3) \quad (2.14)$$

Pour tenir compte de l'union de X_2 et X_4 représentée dans Eq. (2.14), la figure 2.7 peut être modifiée en ajoutant le nœud auxiliaire L_1 de telle sorte que $L_1 = X_2 \cup X_4$ (voir figure 2.8).

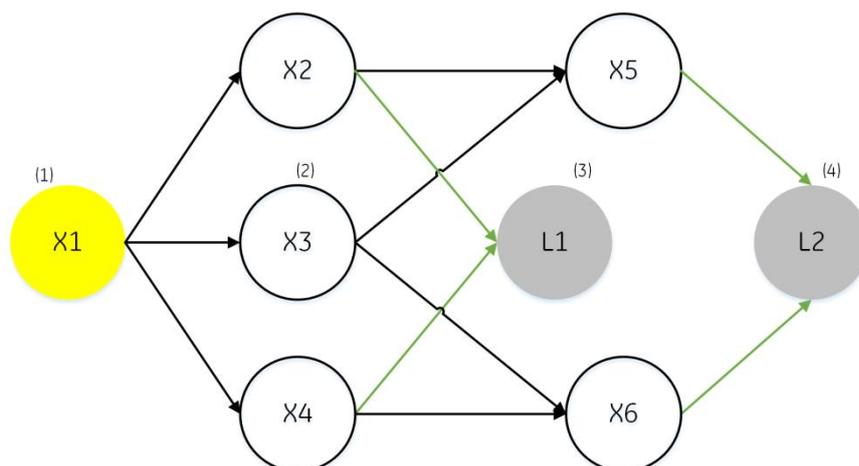


Figure 2.8 Réseau bayésien modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L_1 et L_2 , respectivement.

Ainsi, X_2 et X_4 sont reliés à L_1 à l'aide d'arcs causaux de porte logique « OU », ce qui donne la table de probabilité conditionnelle présentée dans le tableau 2.7 pour le nœud L_1 .

Tableau 2.7 Table des probabilités conditionnelles attribuées au nœud auxiliaire L_1 montrant sa dépendance conditionnelle à l'égard de ses parents par le biais d'une porte logique «OU»

Unités		$P(L_1/X_2, X_4)$	
X_2	X_4	Accident	Absence d'accident
Accident	Accident	1	0
Accident	Absence d'accident	1	0
Absence d'accident	Accident	1	0
Absence d'accident	Absence d'accident	0	1

La probabilité de L_1 est égale à la probabilité de propagation de l'effet domino au deuxième niveau, c'est-à-dire la probabilité qu'au moins une des unités tertiaires X_2 ou X_4 soit impliquée dans l'accident. De même, pour que l'effet domino passe au troisième niveau, il est nécessaire que l'accident dans les unités tertiaires se propage dans au moins une des unités quaternaires. [11]

La probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être estimée comme le produit de $P(X_1)$ et $P(X_3/X_1)$. Ainsi, si DL_1 (Domino Level 1) est connecté à X_1 et X_3 par des arcs causaux de porte logique «ET», $P(DL_1)$ serait égal à la probabilité de l'effet domino de premier niveau. Cela implique que pour que l'effet domino de premier niveau se produise, non seulement l'événement primaire X_1 mais aussi l'événement secondaire X_3 sont nécessaires.

De même, si DL_2 est connecté aux nœuds DL_1 et L_1 par des arcs causaux de porte logique «ET», $P(DL_2)$ serait égal à la probabilité de l'effet domino de deuxième niveau. Cela indique que pour que l'effet domino de deuxième niveau se produise, l'effet domino de premier niveau (c.-à-d. DL_1) et au moins un des événements tertiaires, c.-à-d. L_1 se produisent. Même chose pour le niveau 3. (Voir figure 2.9)

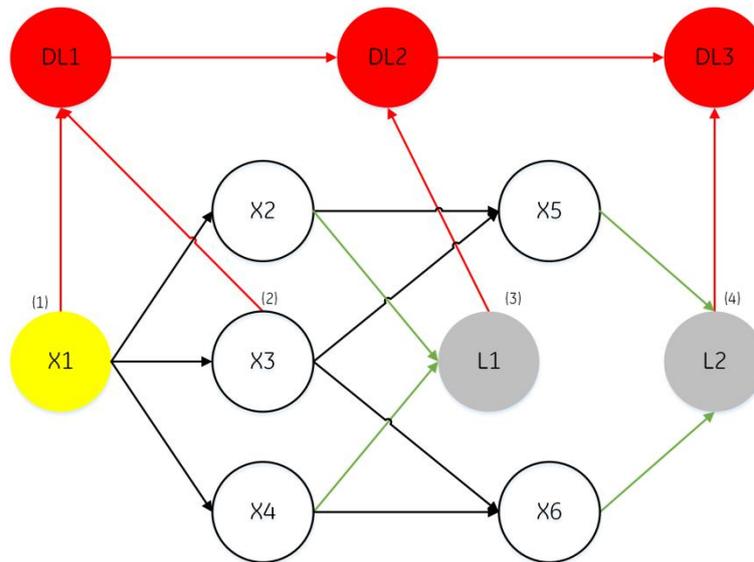


Figure 2.9 Réseau bayésien modifié pour incorporer les 3 niveaux d'effet domino et l'union des événements tertiaires et quaternaires

II.2.1.8. Evaluation des scénarios dominos

L'évaluation des scénarios dominos se fera en calculant la fréquence de ces derniers et en élaborant la carte de l'ensemble des effets.

II.2.1.9. Deuxième niveau de l'étude : identification des événements secondaires à potentiel d'escalade

Après la détermination des scénarios secondaires crédible, il sera possible d'identifier les événements secondaires avec un potentiel d'escalade, qui donneront lieu à des accidents aux conséquences encore plus dramatiques que les précédents. Ce qui nous amènera au deuxième niveau de l'étude en réitérant la procédure réalisée lors de l'évaluation de la propagation des événements primaires.

L'opération se répétera jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'obtenir l'escalade des événements à travers les différentes cibles.

II.2.1.10. Calcul et représentation des indices significatifs de risque

L'objectif principal de la QRA est l'estimation du risque mais de l'exprimer aussi par des indices appelés critère d'acceptation de risque.

Pour obtenir une perspective équilibrée sur l'acceptation du risque, ce dernier doit être évalué de deux points de vue :

- Le risque pour les individus.

- Le risque pour les groupes de personnes.

Il s'agit respectivement du risque individuel et du risque sociétal.

Dans des situations telles que la défaillance d'un dispositif de protection sur une presse électrique par exemple, la formulation appropriée du risque quantifié, est le risque individuel, mais pour les situations susceptibles de nuire à de nombreuses personnes, appelées dangers majeurs, la formulation appropriée d'un risque quantifié est le risque sociétal.

La prise de décision relative à l'acceptation du risque est compliquée et est influencée par de nombreux facteurs tels que le type d'activité, le niveau de perte, les facteurs économiques, politiques et sociaux, la confiance dans l'estimation du risque, l'ampleur des dégâts, etc.

En général, les critères de prise de décision sont classés en trois catégories (Granger & Henrion 1998) :

Critères fondés sur l'utilité : il s'agit de décisions fondées sur l'évaluation des résultats, c'est-à-dire sur la comparaison en termes monétaires des avantages ou bénéfices obtenus par l'adoption d'une mesure de prévention des risques et du coût de son introduction.

Critères fondés sur les droits : ils ne se préoccupent pas principalement des résultats mais du processus et des actions ou activités autorisées. Un exemple extrême de ce type est le critère du "risque zéro" qui dit : indépendamment des avantages et des coûts, et de l'ampleur des risques éliminés, la notion de risque ne doit pas être incluse.

Critères technologiques : ils exigent l'utilisation de la meilleure technologie disponible (ou de la meilleure pratique actuelle) pour la réduction ou la prévention des risques.

Il est à noter que tous ces critères de prise de décision sont destinés à être utilisés à des fins de comparaison numérique. [12]

Ainsi, le problème le plus difficile dans l'application de la tolérabilité du risque est celui de l'évaluation des avantages de la réduction des risques.

De ce fait, les indices de risque sont considérés comme indicateurs pondérés utiles et intéressants qui facilitent la prise de décisions cohérentes, sur la tolérance ou l'acceptation du risque.

Selon leur cas d'utilisation, les indices de risque doivent refléter les objectifs et le contexte de l'évaluation des risques. Une attention adéquate devrait être accordée au temps et aux

ressources disponibles, aux points de vue des parties prenantes et à la perception des risques ainsi qu'aux exigences légales et réglementaires applicables.

II.2.1.10.1. Définitions

- **Risque individuel**

Le risque individuel exprime la fréquence des risques auxquels une personne est exposée, autrement dit, la fréquence qu'une personne soit présente dans la zone d'effet potentiel d'un ou plusieurs accidents. Donc, le nombre de personnes exposées n'affecte pas le risque individuel.

Cet indice est parfois nommé indice de risque de localisation ou indice de risque géographique car il est associé à un lieu particulier plutôt qu'à une personne en particulier. [12][13]

- **Risque sociétal**

Les accidents majeurs sont susceptibles d'affecter un grand nombre de personnes. De ce fait, le risque sociétal exprime le risque pour les groupes de personnes qui peuvent d'être touchées par un accident.

L'estimation du risque sociétal comprend la mesure de la fréquence des accidents en fonction du nombre de personnes touchées. Certaines mesures du risque sociétal sont conçues pour refléter l'observation selon laquelle la société a tendance à se préoccuper davantage des conséquences d'accidents de grande envergure (multi-mortalité) et attribuer une plus grande importance aux accidents de grande ampleur. De ce fait, cet indice reflète le point de vue de la société et dans cette perspective, les risques présentant un faible danger et des conséquences élevées sont pris en compte. [12][13]

II.2.1.10.2. Calcul et représentation des indices de risque

- **Risque individuel**

Le risque individuel est exprimé sous forme d'une ou plusieurs valeurs. Ce dernier, peuvent être représentés sous forme de synthèse graphique qui montre le contour du risque individuel ou sa répartition géographique.

Il est obtenu à travers le calcul de la fréquence prévue d'un événement capable de causer des dommages à chaque emplacement à l'intérieur ou à proximité de l'installation en supposant que quelqu'un qui n'est pas protégé sera présent et exposé sans tenir compte de la fraction du temps pendant lequel la personne est exposée au risque.

Un profil de risque individuel est une représentation graphique du risque individuel en fonction de la distance par rapport à la source de risque autrement dit une représentation plus simple d'un contour de risque. [13]

- **Risque sociétal**

Le risque sociétal est une relation bidimensionnelle entre la gravité des accidents et la fréquence à laquelle chacun d'entre eux est censé se produire. Donc, les analyses visant à estimer le risque sociétal évaluent la fréquence d'occurrence prévue d'un événement par an et le nombre prévu de personnes lésées par cet événement.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte, tels que :

- Le nombre et la répartition géographique de la population
- Le type de population (industrielle, résidentielle, scolaire, etc.)
- La probabilité que des personnes soient présentes dans la zone étudiée.
- Les risques sociétaux peuvent être représentés soit :
- En utilisant la **fréquence discrète** de l'évènement causant N fatalités. Dans ce cas, les graphes sont appelés courbes **f-N**.
- En utilisant la **fréquence cumulée** qui correspond à N fatalités ou plus. Dans ce cas, les graphes sont appelés courbes **F-N**.

Le diagramme F-N est un moyen qui permet de présenter les risques sociétaux. Ils peuvent être établis pour exprimer l'historique des accidents, les résultats d'une analyse quantitative des risques (QRA) ou les critères d'appréciation de la tolérabilité du risque.

Ils sont plus souvent exprimés en termes de fréquence cumulative afin de réduire le nombre de classes dont l'effectif n'est pas significatif. Donc pour chaque fréquence, N représente le nombre minimal de victimes.

Ces graphes sont représentés par des courbes logarithmiques avec l'axe des x représentant les conséquences (nombre de personnes qui peuvent être lésées) et l'axe des y représentant la fréquence d'occurrence cumulée des événements. Les échelles logarithmiques sont utilisées pour pouvoir exprimer les valeurs de F et N qui couvrent parfois de multiples ordres de grandeur.

Ces courbes sont élaborées de la même façon que ce soit pour exprimer des conséquences réelles (l'historique des accidents réels) ou des conséquences projetées (les résultats de la QRA).

Pour construire la courbe F-N, une liste de tous les événements doit être établie, leurs fréquences et leurs conséquences (nombre de fatalités / personnes exposées N) triées par **valeurs décroissantes de N**. [13]

Le tableau 2.8 illustre comment obtenir les fréquences cumulées.

Tableau 2.8 Calcul des fréquences cumulées

Evènement (E)	Nombre de personnes exposées (N)	Fréquence (f)	Fréquence cumulée (F)
E ₁	N ₁	f ₁	F ₁ = f ₁
E ₂	N ₂	f ₂	F ₂ = f ₁ + f ₂
E ₃	N ₃	f ₃	F ₂ = f ₁ + f ₂ + f ₃
...
E _n	N _n	f _n	$F_n = \sum_{i=1}^n F_i$

Tel que : $N_1 > N_2 > N_3 > \dots > N_n$

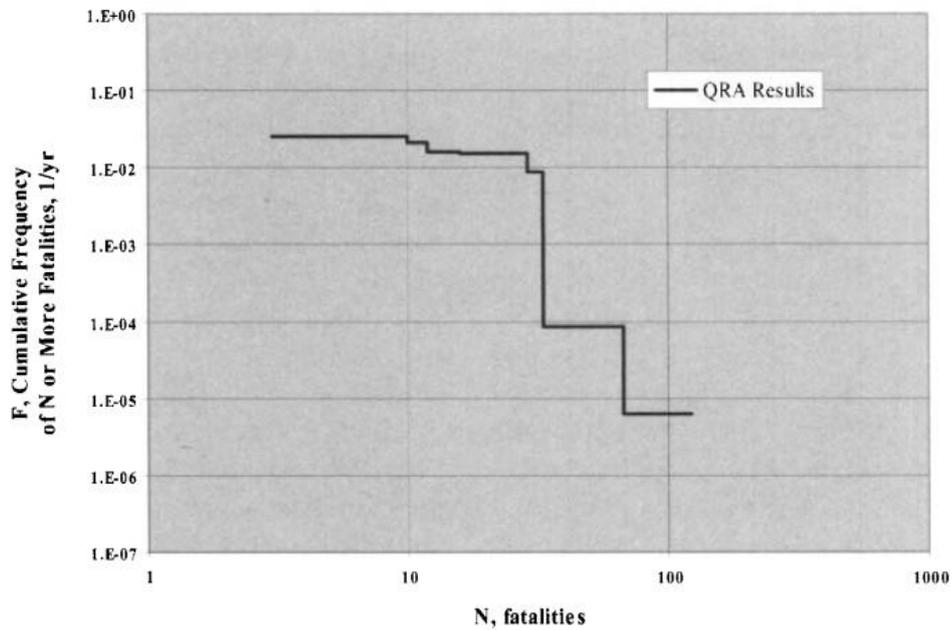


Figure 2.11 Exemple d'un diagramme F-N qui représente les résultats d'une QRA

II.2.1.10.3. Interprétations

Il est important de noter que pour interpréter et appliquer correctement les critères de risque, il est essentiel de comprendre les bases du calcul de risque.

Les critères de risque, considérés, en général, comme moyen permettant de fournir une information, permettent aux exploitants et même aux autorités de prendre des décisions judicieuses par rapport la tolérabilité du risque, la mesure dans laquelle la mise en place des mesures de réduction du risque supplémentaires est justifiée ainsi que l'aménagement des installations industrielles et même l'aménagement du territoire à proximité.

Les graphes représentant le risque sociétal sont généralement comparés à des courbes définissant les limites d'acceptation de risque appropriés à chaque cas étudié (voir Annexe IV).

II.3 Application de la méthode QRA

La méthodologie de la QRA ayant été bien définie, voici à présent son application à travers le cas d'ALGESCO et de son centre de maintenance.

II.3.1. Détermination des événements primaires et leurs fréquences

Depuis 2015, plusieurs étudiants de la spécialité QHSE-GRI ont effectué des projets de fin d'étude au sein d'ALGESCO. Chaque année réalisant diverses analyses de risque, ce qui permet l'utilisation des résultats des études concernant les process de traitement et de revêtement thermique ainsi que l'étude sur la sûreté de fonctionnement des trois citernes Linde Gaz qui contiennent de l'oxygène, de l'azote et de l'argon, d'une capacité de 10530 L chacune.

Grâce à ces études, les événements primaires les plus probables et également les plus susceptibles de générer des effets dominos ont pu être déterminés, et sont mis en évidence dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9 Evénements redoutés centraux et événements primaires se produisant au niveau des unités des process à haut risque d'ALGESCO [16][17]

Unités critiques	Evènements redoutés centraux	Evénements primaires
Fours sous vide	Mélange explosif H ₂ + O ₂	Explosion
	Surchauffe	Incendie
Station de revêtement thermique	Fuite externe de kérosène	Pool fire
	Fuite externe d'hydrogène	VCE

La détermination des fréquences d'occurrence des événements primaires est nécessaire afin de calculer par la suite la fréquence des effets dominos. Le calcul se fait en appliquant la relation (2.1). Les résultats sont donnés dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10 Fréquences d'occurrence des événements primaires

Unités critiques	Événements primaires	F_{erc} (ans ⁻¹)	P_1	F_{ep} (ans ⁻¹)
Station de revêtement thermique	Pool fire	0.48	1.383×10^{-8}	6.638×10^{-9}
	VCE	0.921	5.261×10^{-8}	4.845×10^{-8}
Fours sous vide	Incendie	0.100	1.440×10^{-3}	1.440×10^{-4}
	Explosion	0.138	0.020	2.772×10^{-3}

Pour rappel :

$$F_{ep} = F_{erc} \times P_1 \quad (2.1)$$

F_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement primaire (ans⁻¹).

F_{erc} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement redouté centrale menant à l'accident primaire (ans⁻¹).

P_1 : Probabilité du scénario primaire.

En sachant que les valeurs de F_{erc} et P_1 ont été prises des études antérieures.

II.3.2. Application des étapes de la QRA : de l'étape 2 à l'étape 10

La deuxième et troisième étape de la QRA consiste à identifier les effets physiques de chaque événement primaire puis évaluer la propagation de ce dernier.

Le tableau 2.11 présente les unités critiques ainsi que l'événement primaire qui a lieu en chacune d'entre elles, le type de propagation, les différents effets physiques correspondants et leurs fréquences. Telle que la fréquence des effets est égale à la fréquence des événements primaires.

Tableau 2.11 Unités critiques, événements primaires, type de propagation et effets physiques correspondants

Unités critiques	Evènements primaires	Propagation	Effets	F_{ep} (ans⁻¹)
Station de revêtement thermique	VCE	Spatiale	Surpression	4.845 x 10 ⁻⁸
			Radiation thermique	-
			Projection	-
	Pool fire	Spatiale	Radiation thermique	6.638 x 10 ⁻⁹
Temporelle				
Fours sous vide	Explosion	Spatiale	Surpression	2.772 x 10 ⁻³
			Radiation thermique	-
			Projection	-
	Incendie	Spatiale	Radiation thermique	1.440 x 10 ⁻⁴
		Temporelle		

Il est a noté que pour quantifier la propagation des effets il sera pris en compte de :

- L'intensité de radiation thermique **I** (kW.m⁻²), pour l'incendie au niveau des fours et le pool fire.
- La surpression **ΔP** (kPa), pour les explosions et le VCE.

Pour ce qui est des effets de projection (missiles) seule une évaluation qualitative sera possible.

L'étape suivante consiste donc à évaluer la propagation spatiale des différents effets. Pour se faire, le logiciel PHAST® sera utilisé pour délimiter le cercle d'action de l'effet de surpression afin de repérer les cibles potentielles. Puis grâce au logiciel ANSYS STRUCTURAL® une idée plus précise de la destruction de l'équipement sera possible. Et pour ce qui est de l'évaluation de la propagation de l'effet thermique, elle se fera par le logiciel PyroSim®.

Ces différentes simulations nous permettront d'élaborer la carte des effets et les résultats obtenus seront comparés aux valeurs seuils d'escalade présenté dans le tableau 2.5 afin d'identifier les cibles.

Il est à noter que dans les simulations PHAST®, nous nous intéresserons à deux seuils de surpression : **0.13** et **0.20 bar**, car ces valeurs se rapprochent des seuils d'escalade.

Les conditions météorologiques suivantes sont définies :

- Simulations PHAST® : Les trois conditions 1.5/F 1.5/D et 5D, seront utilisées pour les événements se déroulant à l'extérieur du shop. Quant aux événements se déroulant à l'intérieur, seul la condition 1.5/F sera utilisée.
- Simulations PyroSim® : La température sera fixée à 15°C puis 35°C et à chaque température, on définira deux vitesses du vent 1.5 m.s⁻¹ et 5 m.s⁻¹. Ainsi nous obtiendrons des simulations pour le cas où les événements se produisent en hiver et en été.

Vient ensuite la **quatrième** et **cinquième étape** qui consistent à comparer les résultats des simulations aux valeurs seuils d'escalade, afin d'identifier les cibles et le calcul des probabilités d'escalade.

Puis lors de la **sixième étape**, la base de données recueillie par Abdolhamidzadeh et al. 2011 sera utilisée afin de déterminer les scénarios secondaires susceptibles de se produire une fois que l'événement primaire a eu lieu.

Cette base de données présentée en annexe V, regroupe l'historique de tous les accidents à effets dominos produits dans le monde durant la période 1917 - 2009 et explicite les séquences d'accidents, ce qui permettra d'identifier les scénarios secondaires les plus crédibles.

Durant la **septième** et **huitième étape**, pour modéliser la propagation probable des effets dominos, nous allons utiliser les réseaux Bayésiens

Dans le cas où il existe un deuxième niveau de la QRA (**étape 10**), il va falloir réitérer les étapes allant de 2 à 8 en considérant comme événement secondaire tout événement engendrant des conséquences plus dramatiques que l'événement primaire. Puis déterminer les scénarios tertiaires (s'ils existent) et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'y est plus d'escalade des événements.

Pour finir, lors de la **neuvième étape** nous allons déterminer les indices de risque : risque sociétal et risque individuel pour l'ensemble des scénarios dominos sélectionnés.

II.3.2.1. Sélection de l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique »

La QRA va être appliquée à l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».

II.3.2.1.1 Sélection des effets et évaluation de la propagation

Pour les deux cas (cabine 1 et cabine 2 de coating), l'événement primaire VCE est causé par une inflammation retardée d'une expansion de 0.136 kg d'H₂ à l'intérieur de l'une des cabines [17], le modèle utilisé pour la modélisation PHAST® est le modèle TNT.

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau 2.12.

Tableau 2.12 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».

Combustible	Hydrogène
Quantité	0.136 kg
Condition météorologique	1.5/F
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimal	0
Distance maximal	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation dans les deux cas sont représentés dans les figures 2.12 et 2.13.

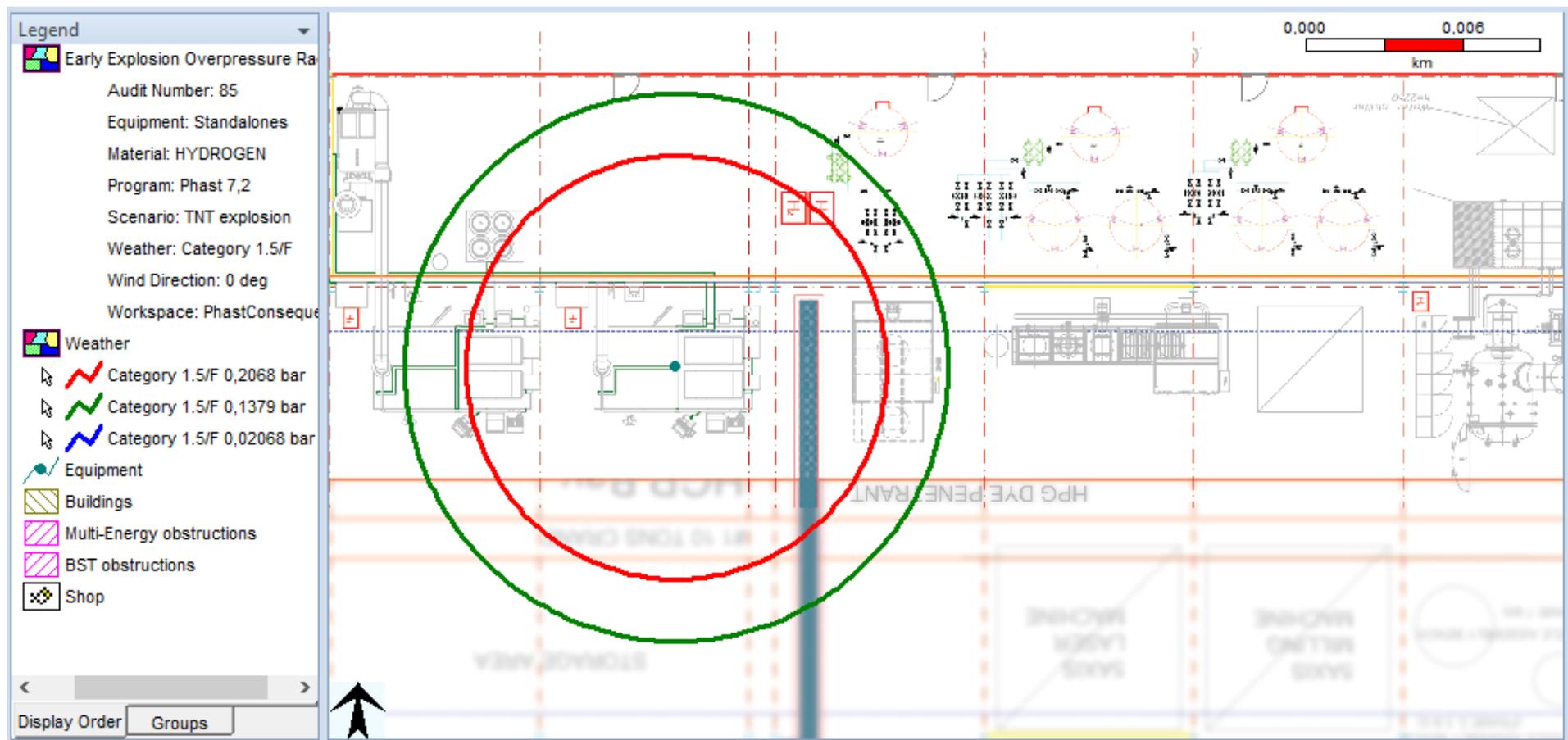


Figure 2.12 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement primaire « VCE dans la cabine de coating N°1 »

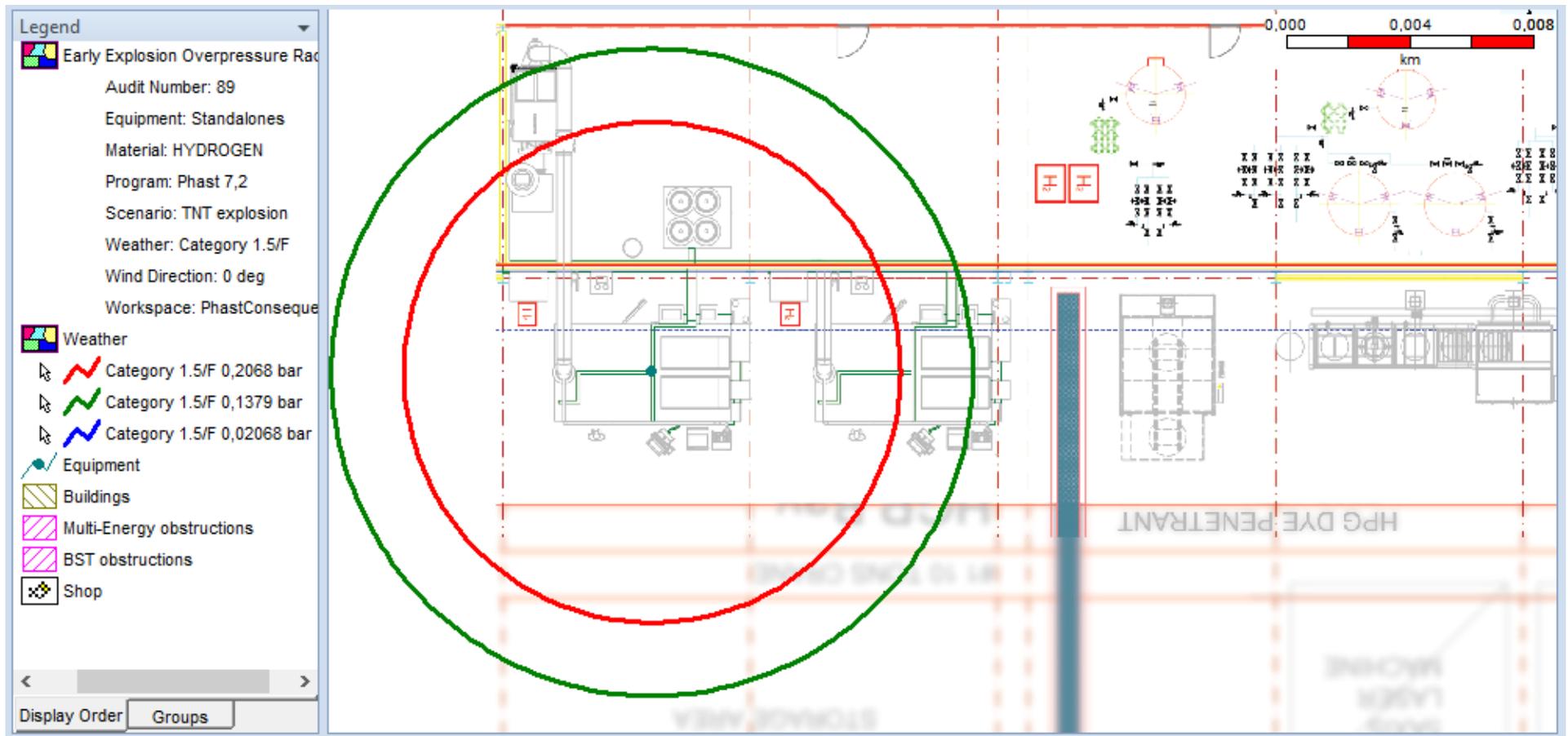


Figure 2.13 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement primaire « VCE dans la cabine de coating N°2 »

Interprétation des résultats :

a- Événement primaire « VCE dans la cabine de coating N°1 »

Pour la cabine de coating N°1, en déterminant les distances séparant les équipements cibles (réservoir de kérosène, racks d'H₂ à l'intérieur et à l'extérieur du shop) par rapport à l'épicentre de l'explosion, et en s'appuyant sur le rapport extrait de PHAST®, il est possible de déterminer les pressions statiques au niveau de ces derniers :

- Au niveau du rack d'H₂ à l'intérieur du shop, $d = 3 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$
- Au niveau des racks d'H₂ extérieurs, $d = 6.80 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 0,2670 \text{ bar} = 26.70 \text{ kPa}$
- Au niveau du réservoir de kérosène, $d = 7 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 0,2565 \text{ bar} = 25.65 \text{ kPa}$

Néanmoins, suite au choc avec le mur qui sépare le shop de la zone de stockage il est difficile de savoir si le réservoir de kérosène et les racks d'H₂ extérieurs sont touchés. D'où la nécessité de la simulation avec le logiciel ANSYS STRUCTURAL®.

En effet, les résultats obtenus par ANSYS STRUCTURAL® sont plus précis, car ce logiciel prend en considération la résistance et les limites d'élasticité des matériaux constituant le mur en sandwich, les racks d'H₂, le réservoir de kérosène et le mur qui sépare ces deux derniers.

Le modèle utilisé pour simuler les effets de l'onde de choc induite par le VCE de la cabine de coating N°1 est celui de la dynamique explicite. Ce modèle nous permet de déterminer la déformation exprimée sous forme de déplacement total.

Après avoir introduit le matériau qui correspond à chaque élément, la masse TNT équivalente et l'emplacement du point de détonation, nous avons obtenu les résultats présentés dans les figures 2.14 à 2.16.

Les résultats de la simulation montrent que le mur qui sépare le shop de la zone de stockage et dont l'épaisseur est de 10 cm va subir une déformation qui varie de 16 à 32 cm ce qui mène également à la déformation du réservoir de kérosène en plastique de 16 à 28 cm.

Cette simulation nous permet de conclure qu'effectivement le mur qui sépare le shop de la zone de stockage est partiellement détruit et que le réservoir de kérosène est touché mais subit qu'un déplacement minime, il n'y a donc pas de déversement. Par contre le rack d'H₂ ne sera pas touché directement par le VCE de la cabine de coating N°1.

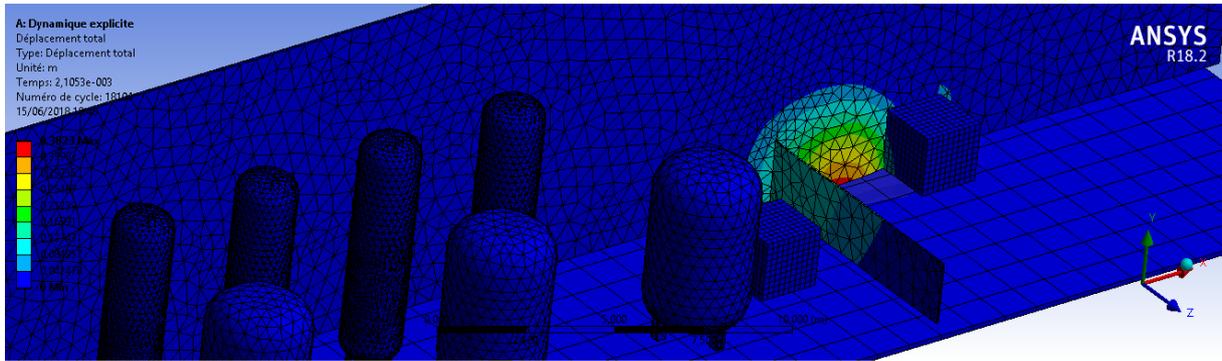


Figure 2.14 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N° 1 à $t = 2,1057e^{-3}$ sec.

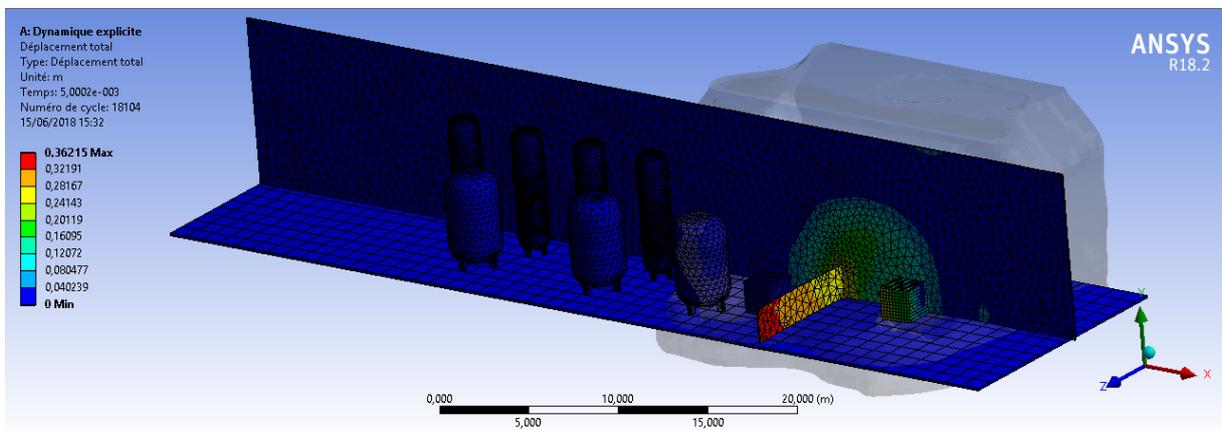


Figure 2.15 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N° 1 à $t = 5,0002 e^{-3}$ sec

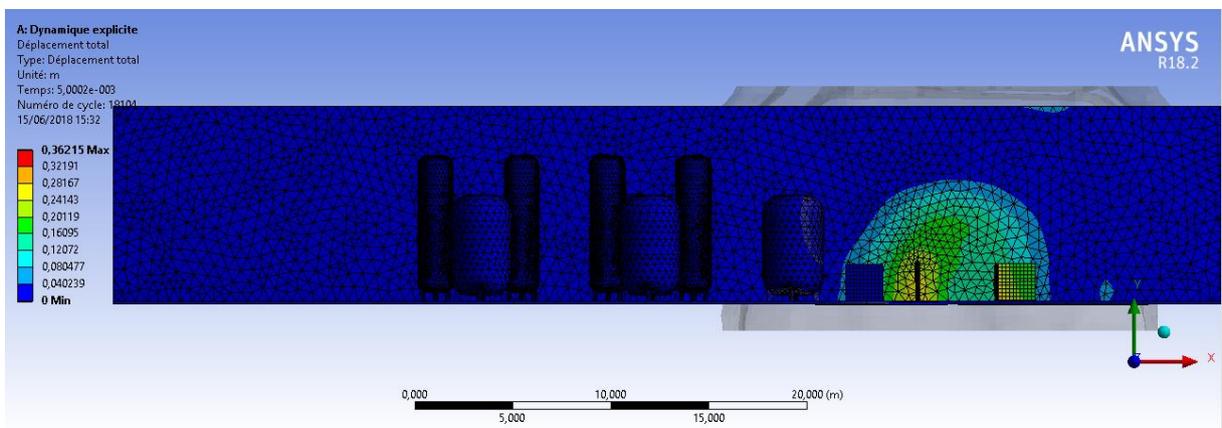


Figure 2.16 Déformations dues aux effets de surpression suite au VCE de la cabine de coating N° 1 à $t = 5,0002 e^{-3}$ sec – vue de face.

b- Evénement primaire « VCE dans la cabine de coating N°2 »

Pour ce qui est de la cabine de coating N°2, le VCE aura comme conséquences la destruction du mur en sandwich, de la cabine de coating N°1, des racks d'H₂ (à l'intérieur du shop) et le déversement du kérosène.

En déterminant les distances séparant les équipements de l'épicentre de l'explosion, et en s'appuyant sur le rapport extrait de PHAST®, on détermine les pressions statiques au niveau de chaque cible :

- Au niveau du rack N°1 d'H₂, d = 4.40 m → ΔP = 0,5616 bar = 56.16 kPa
- Au niveau du rack N°2 d'H₂, d = 3 m → ΔP = 1 bar = 100 kPa
- Au niveau du réservoir de kérosène, d = 4 m → ΔP = 0,6634 bar = 66.34 kPa

L'effet de radiation du VCE n'étant pas assez fort pour provoquer l'inflammation du kérosène (la température d'auto inflammation du kérosène est égale à 220°C), il n'y aura pas d'escalade et donc pas d'effet domino de deuxième niveau.

Pour ce qui des racks d'H₂ se trouvant à l'intérieur du shop, les conséquences de leur destruction sont moins importantes que celles de l'événement primaire du fait de la quantité minimale d'H₂ (25 L par rack) et qu'aucun équipement ne se trouvent à proximité. Donc il n'y aura pas d'effet domino de niveaux 2.

II.3.2.1.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

Pour le calcul de la probabilité d'escalade de chaque cible, la fonction probit approprié à chaque cible est utilisée afin d'appliquer la relation (2.2). Par la suite, la fréquence de l'effet domino est calculée en appliquant la relation (2.3). Les résultats sont donnés dans le tableau 2.13.

Pour rappel :

$$P_{i,j} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{i,j} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad (2.2)$$

$P_{i,j}$: Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i

$Y_{i,j}$: Fonction probit.

$$F_{ed} = F_{ep} \times P_{i,j} \quad (2.3)$$

F_{ed} : Fréquence d'occurrence annuelle de la séquence domino (installation j impactée suite à un accident dans i) (ans^{-1}).

F_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'accident primaire (ans^{-1}).

Tableau 2.13 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino pour chaque cible touchée par l'événement primaire l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».

Equipements	Vecteurs d'escalade	Cibles		Pique de pression statique ΔP (kPa)	Valeurs seuils d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_{ed1} (ans ⁻¹)
		Equipements	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
Cabine de coating N°1	Surpression	Rack N°1 d'H ₂ (25L)	Pressurisé	100	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82 \ln (\Delta P_{i,j})$	-6.059	1.417×10^{-8}	6.865×10^{-16}
Cabine de coating N°2	Surpression	Rack N°1 d'H ₂ (25L)	Pressurisé	56.16	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82 \ln (\Delta P_{i,j})$	-7.109	2.549×10^{-9}	5.640×10^{-14}
		Rack N°2 d'H ₂ (25L)		100			-6.059	1.417×10^{-8}	
		Réservoir de kérosène	Atmosphérique	66.34	22 kPa	$Y_{i,j} = - 9.36 + 1.43 \ln (\Delta P_{i,j})$	-3.361	1.164×10^{-6}	

Pour le calcul de la fréquence de l'effet domino de niveau 1 (F_{ed1}) engendré par le VCE au niveau de la cabine de coating N°2, nous avons choisi la probabilité d'escalade la plus élevée, qui est en l'occurrence la probabilité d'escalade au réservoir de kérosène.

Nous pouvons dès lors utiliser les réseaux Bayésiens pour schématiser les séquences dominos de cet événement primaire, mais il est plus intéressant de les utiliser une fois que la totalité des événements (secondaires, tertiaires, etc.) sont étudiés. Nous ferons de même pour tous les événements primaires.

II.3.2.1.3. Détermination des scénarios secondaires

Les scénarios secondaires retenus, pour l'événement primaire VCE au niveau des cabines de coating, sont donnés dans le tableau 2.14 avec la fréquence d'occurrence de chacun d'entre eux pour pouvoir par la suite calculer la fréquence de l'effet domino de niveau 2 (s'il existe).

Il est à noter que la fréquence d'occurrence de l'événement secondaire (F_2) est égale à la fréquence d'occurrence de l'effet domino de niveau 1 (F_{ed1}).

Il est également inutile de donner la fréquence d'occurrence des scénarios secondaires dus au VCE de la cabine N°2, car l'effet domino engendré s'arrêtera au niveau 1, comme expliqué dans la section II.3.2.1.1.

Tableau 2.14 Scénarios secondaires les plus susceptibles de se produire suite à l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique ».

Événement primaire	Scénarios secondaires	F_2 (ans ⁻¹)
VCE au niveau de la cabine N°1	-Explosion du rack N°1 d'H ₂ à l'intérieur du shop (25L)	6.865x10 ⁻¹⁶
VCE au niveau de la cabine N°2	-Rupture du réservoir de kérosène et déversement du contenu dans la zone de stockage. -Explosion des racks d'H ₂ à l'intérieur du shop (25L chacun)	-

II.3.2.1.4. Deuxième niveau de l'étude : Identification des événements secondaires

Nous allons réitérer toutes les étapes vues dans les titres II.3.2.1.1 et II.3.2.1.2 pour l'événement secondaire : « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating ». Puis déterminer les scénarios tertiaires.

II.3.2.1.4.1. Sélection des effets et évaluation de la propagation

Pour la modélisation PHAST®, le modèle utilisé est le modèle TNT.

Calcul de la quantité d'H₂ :

$$m_{H_2} = \rho_{H_2} \cdot V_{H_2}$$

Avec $\rho_{H_2} = 0.08988 \text{ kg.m}^{-3}$

Et sachant que le rack contient 5 bouteilles d'une capacité de 5L chacune

$$\Rightarrow V_{H_2} = 25 \text{ L} = 0.025 \text{ m}^3$$

Ce qui donne : $m_{H_2} = 2.247 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau 2.15.

Tableau 2.15 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating » émanant de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».

Combustible	Hydrogène
Quantité	$2.247 \times 10^{-3} \text{ kg}$
Condition météorologique	1.5/F
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimal	0
Distance maximal	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation de la surpression sont représentés dans la figure 2.17

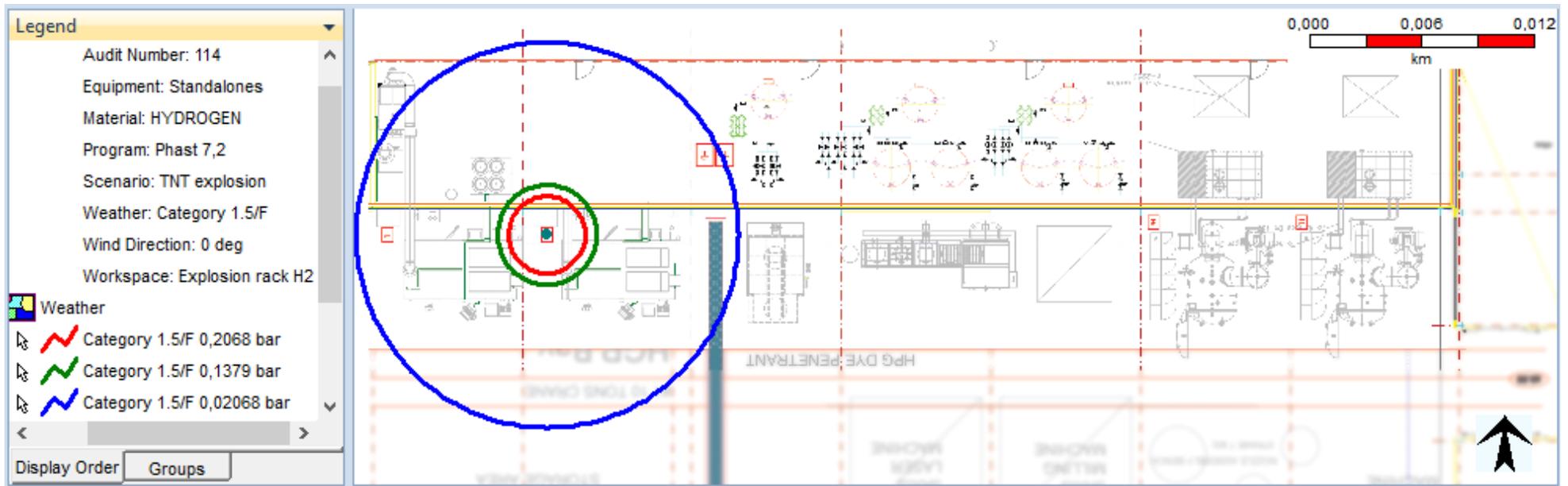


Figure 2.17 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating »

Interprétation des résultats :

En déterminant les distances séparant les équipements cibles (réservoir de kérosène, racks d'H₂ extérieurs) par rapport à l'épicentre de l'explosion, et en s'appuyant sur le rapport extrait de PHAST®, il est possible de déterminer les pressions statiques au niveau de ces derniers :

- Au niveau des racks d'H₂ extérieurs, $d = 8.80 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 0,0249 \text{ bar} = 2.49 \text{ kPa}$.
- Au niveau du réservoir de kérosène, $d = 2.80 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 0,1255 \text{ bar} = 12.55 \text{ kPa}$.

En prenant en compte l'effet de synergie entre l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 » et l'événement secondaire « Explosion du rack d'H₂ N°1 de la station de coating », les vecteurs d'escalades doivent être sommés. Ce qui nous permet d'obtenir les résultats suivants :

- Au niveau des racks d'H₂ extérieurs, $\Delta P = 2.49 + 26.70 = 29.19 \text{ kPa}$.
- Au niveau du réservoir de kérosène, $\Delta P = 12.55 + 25.65 = 38.2 \text{ kPa}$.

II.3.2.1.4.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

La probabilité d'escalade de l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating » ainsi que la fréquence de l'effet domino de deuxième niveau sont données dans le tableau 2.16. En sachant que : $F_{ed2} = F_2 \times P_{i,j}$

Pour ce calcul de fréquence, la probabilité d'escalade la plus élevée est choisie et qui est, en l'occurrence, la probabilité d'escalade au réservoir de kérosène.

L'effet de radiation dus à la synergie entre le VCE au niveau de la cabine N°1 et de l'explosion du rack N°1 d'H₂ n'étant pas assez fort pour provoquer l'inflammation du kérosène (la température d'auto inflammation du kérosène est égale à 220°C), il n'y aura pas d'escalade et donc pas d'effet domino de troisième niveau. Contrairement à la destruction des racks d'H₂ qui générera une escalade.

Certes la probabilité d'escalade de la synergie entre l'événement primaire et l'événement secondaire est plus faible au niveau des racks extérieurs d'H₂ qu'au niveau du réservoir de kérosène, mais dans l'étude des effets dominos tous les cas doivent être étudiés.

Tableau 2.16 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour chaque cible dus à la synergie de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 » et l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating »

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles		Pique de pression statique ΔP (kPa)	Valeurs seuils d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_{ed2} (ans ⁻¹)
		Equipements	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
Synergie entre le VCE au niveau de la cabine N°1 et l'explosion du rack N°1 d'H ₂	Surpression	Racks extérieurs d'H ₂	Pressurisé	29.19	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82 \ln (\Delta P_{i,j})$	-8.300	3.641×10^{-10}	2.198×10^{-22}
		Réservoir de kérosène	Atmosphérique	38.2	22 kPa	$Y_{i,j} = - 9.36 + 1.43 \ln (\Delta P_{i,j})$	-4.151	3.203×10^{-7}	

II.3.2.1.4.3. Détermination des scénarios tertiaires

Les scénarios tertiaires retenus, pour l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ de la station de coating », sont :

- Rupture du réservoir de kérosène et le déversement de son contenu dans la zone de stockage.
- Explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage.

II.3.2.1.5. Troisième niveau de l'étude : Identification des événements tertiaires

Comme dit précédemment (dans le titre II.3.2.1.4.2), l'événement tertiaire donnant lieu à une escalade est l'explosion des racks extérieurs d'H₂, que nous allons étudier dans le titre suivant. Telle que : $F_3 = 3.641 \times 10^{-10} \times 6.865 \times 10^{-16} = 2.500 \times 10^{-25} \text{ ans}^{-1}$

II.3.2.1.5.1. Sélection des effets et évaluation de la propagation

Pour la modélisation PHAST®, le modèle utilisé est le modèle TNT.

Calcul de la quantité d'H₂ :

$$m_{H_2} = \rho_{H_2} \cdot V_{H_2}$$

Sachant qu'il y a deux racks, contenant 12 bouteilles d'une capacité de 5L chacune

$$\Rightarrow V_{H_2} = 120 \text{ L} = 0.12 \text{ m}^3$$

Ce qui donne : $m_{H_2} = 0.08988 \times 0.12 = 0.0108 \text{ kg}$

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau 2.17.

Tableau 2.17 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage » émanant de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».

Combustible	Hydrogène
Quantité	0.0108 kg
Condition météorologique	1.5/F, 1.5/D et 5/D
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimal	0
Distance maximal	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation de la surpression sont représentés dans la figure 2.18.

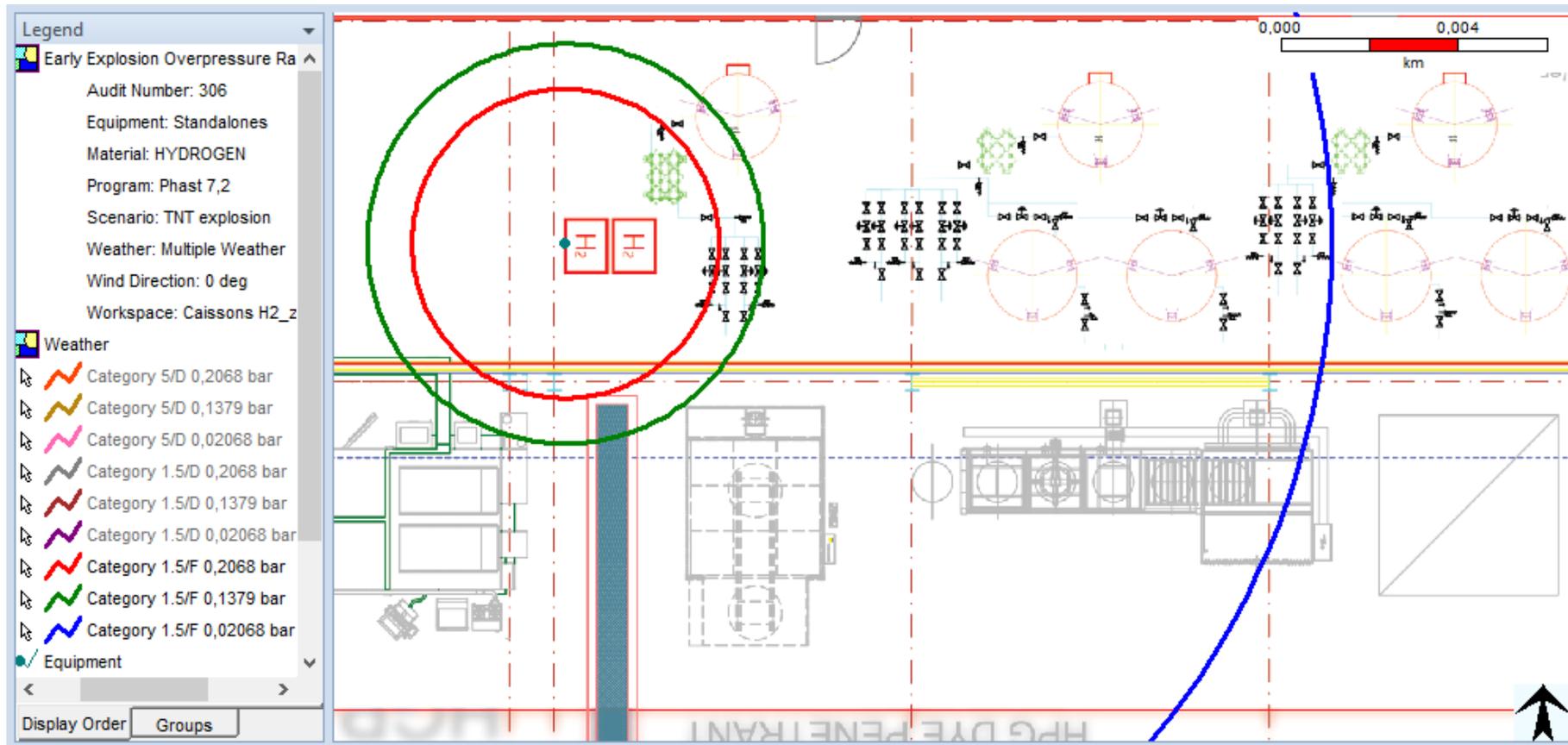


Figure 2.18 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement tertiaire « Explosion des racks d' H_2 dans la zone de stockage » suite à la synergie entre l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 » et l'événement secondaire « Explosion du rack N° d' H_2 de la station de coating ».

Interprétation des résultats :

L'explosion étant indépendante de la température et de la vitesse du vent, les rayons de surpressions sont superposés pour les 3 cas (1.5/F, 1.5/D et 5D).

Nous constatons que la citerne d'O₂ se trouve dans le périmètre critique de surpression, c'est donc une cible potentielle.

En déterminant la distance qui sépare la cible potentielle de l'épicentre de l'explosion, et en s'appuyant sur le rapport extrait de PHAST®, nous déterminons la pression statique au niveau de la citerne d'O₂ : $d = 3.80 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 0,1763 \text{ bar} = 17.63 \text{ kPa}$

Afin de s'assurer de la déformation de la citerne, le logiciel ANSYS STRUCTURAL® est utilisé.

En utilisant le même modèle (dynamique explicite) que la section II.3.2.1.1, nous avons simulé les effets de l'onde de choc due à l'explosion des racks extérieurs d'H₂ sur la citerne d'O₂. Le point de détonation a été fixé au même endroit que pour la simulation PHAST®. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 2.19 et 2.20.

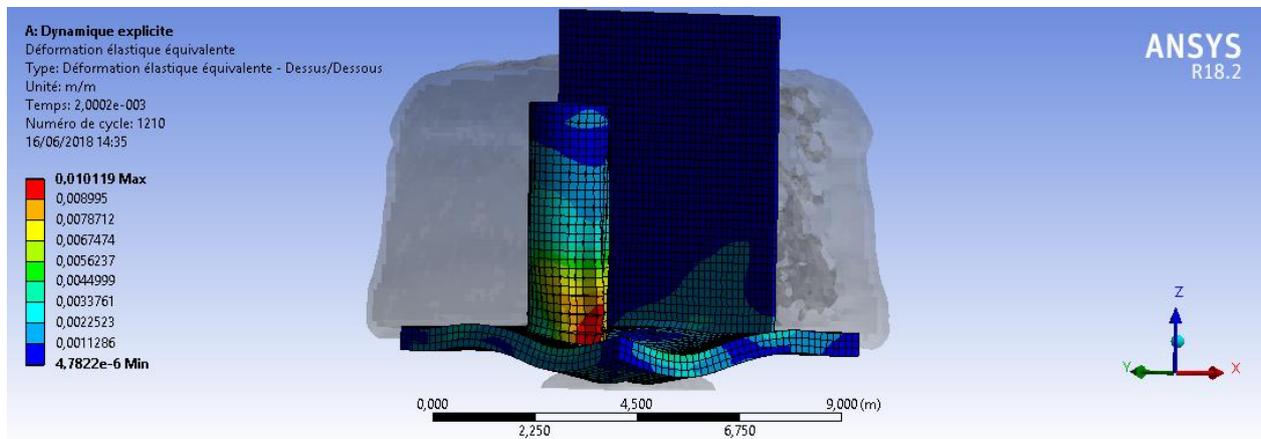


Figure 2.19 Déformations élastiques équivalentes du sol et du cylindre représentant la citerne d'O₂ à $t = 2,0002 \text{ e}^{-3} \text{ sec}$ vue de face

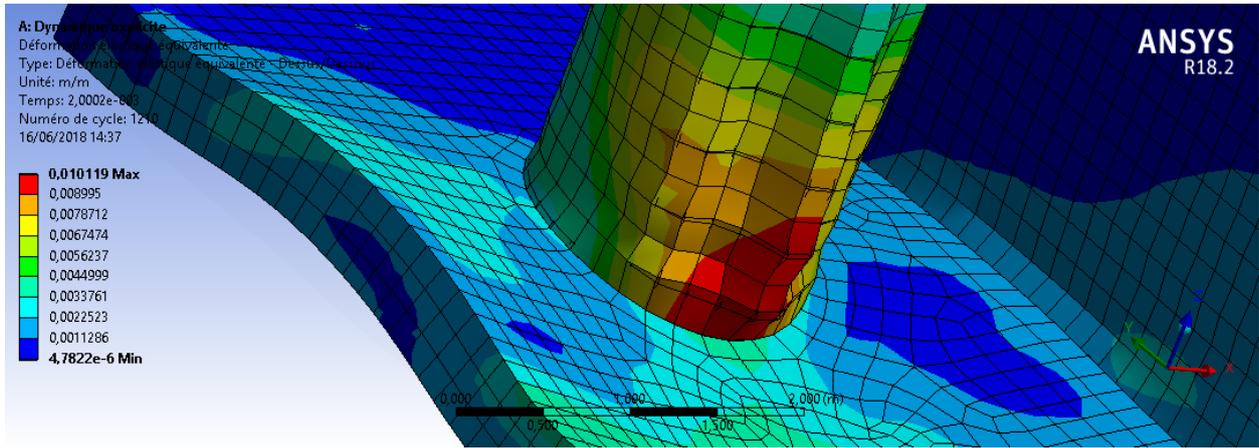


Figure 2.20 Déformations élastiques équivalentes du sol et du cylindre représentant la citerne d'O₂ à t= 2,0002 e⁻³ sec.

Les résultats constatés montrent bien que la citerne d'O₂, dont l'épaisseur des parois est de 14 mm, subit une déformation importante, surtout dans sa partie basse. La déformation élastique équivalente atteint les 10,119 cm et donc les parois de la citerne seront endommagées.

II.3.2.1.5.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

La probabilité d'escalade de l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ dans la zone de stockage » ainsi que la fréquence de l'effet domino de troisième niveau sont données dans le tableau 2.18. En sachant que : $F_{ed3} = F_3 \times P_{i,j}$

Tableau 2.18 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de troisième niveau pour l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage » dus à l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».

Source	Vecteur d'escalade	Cible		ΔP (kPa)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		P_{ij}	F_{ed3} (ans ⁻¹)
		Equipement	Type			Expression	Y_{ij}		
Explosion des racks d'H ₂ dans la zone de stockage	Surpression	Citerne d'O ₂	Pressurisé	17.63	17 kPa	$Y_{ij} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{ij})$	-9.217	8.138×10^{-11}	2.035×10^{-35}

II.3.2.1.5.3. Détermination des scénarios quaternaires

Les scénarios quaternaires retenus, pour l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ dans la zone de stockage », est : la rupture de la citerne d'O₂.

Etant donné que nous ne disposons d'aucun moyen informatique nous permettant de simuler ce scénario, nous avons opté pour une estimation qualitative des dégâts qui pourrait mener à un scénario quinquénaire.

II.3.2.1.5.4. Quatrième niveau de l'étude : Identification des événements quaternaires

Comme dit précédemment l'événement quaternaire « Rupture de la citerne d'O₂ » peut donner lieu à une escalade, mais nous ne pourrions étudier cette possibilité que de manière qualitative.

L'effet de synergie entre l'événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ dans la zone de stockage » et de l'événement quaternaire « Rupture de la citerne d'O₂ » peut donner lieu au scénario quinquénaire: rupture de la citerne d'Argon, qui alimente le four N°2 (Ar_2).

Nous justifions cela, par la proximité des 3 équipements (la distance séparant Ar_2 de O₂ est de 4.90 m et la distance séparant les racks d'H₂ de Ar_2 est égale à 7.50 m).

Par la suite, l'endommagement d'Ar_2 mènera à un 6^{ème} événement qui est la surchauffe du four. Car en effet, la citerne Ar_2 sert à refroidir le four N°2 durant le processus de traitement thermique des pièces d'une turbine.

Ce qui nous permet de conclure que pour l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 », des effets dominos de 5^{ème} niveau peuvent être observés.

II.3.2.1.6. Evaluation des scénarios dominos

Afin de modéliser la propagation probable des effets dominos de l'événement primaire « VCE au niveau de la station de revêtement thermique », nous allons utiliser les réseaux Bayésiens. Nous distinguons deux cas :

- a. Le VCE se produit au niveau la cabine N°1

La figure 2.21 correspond au réseau Bayésien constitué par l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».

Nous distinguons deux chaînes dominos :

Chaîne domino 1 : VCE cabine 1 → Explosion rack 1 d'H₂ → Rupture réservoir de kérosène. (2 niveau d'effets dominos)

Chaîne domino 2 : VCE cabine 1 → Explosion rack 1 d'H₂ → Explosion racks extérieurs d'H₂ → Rupture citerne O₂ → Rupture citerne Ar₂ → Surchauffe du four. (5 niveau d'effets dominos).

La chaîne domino la plus crédible est la chaîne 1 car la fréquence de l'événement tertiaire « Rupture du réservoir de kérosène » est plus grande que celle de l'autre événement tertiaire « Explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage ».

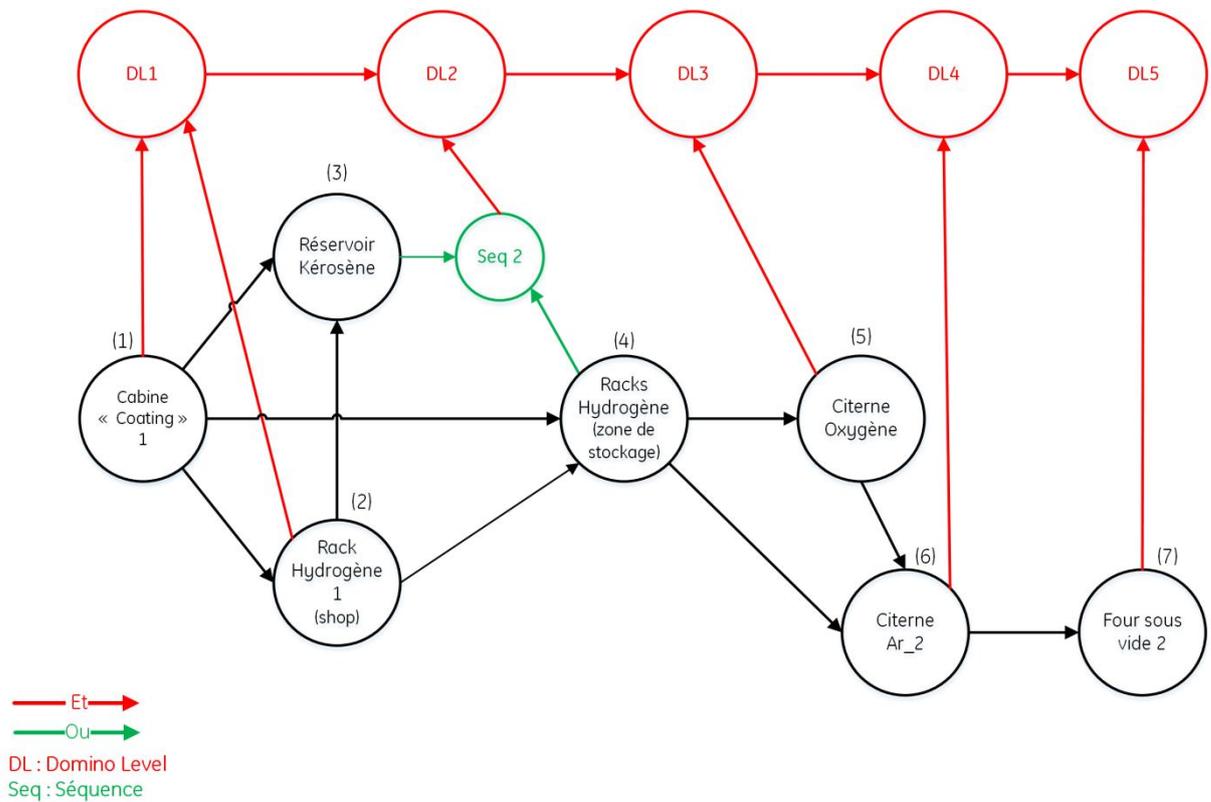


Figure 2.21 Réseau Bayésien de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».

b. Le VCE se produit au niveau la cabine N°2

La figure 2.22 correspond au réseau Bayésien constitué par l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».

Nous distinguons trois chaînes dominos :

Chaîne domino 1 : VCE cabine 2 → Rupture réservoir de kérosène. (1 niveau d'effets dominos)

Chaîne domino 2 : VCE cabine 2 → Explosion rack 1 d'H₂. (1 niveau d'effets dominos)

Chaîne domino 3 : VCE cabine 2 → Explosion rack 2 d'H₂. (1 niveau d'effets dominos)

La chaîne domino la plus crédible est la chaîne 1 car la fréquence de l'événement secondaire « Rupture du réservoir de kérosène » est plus grande que celle des autres événements.

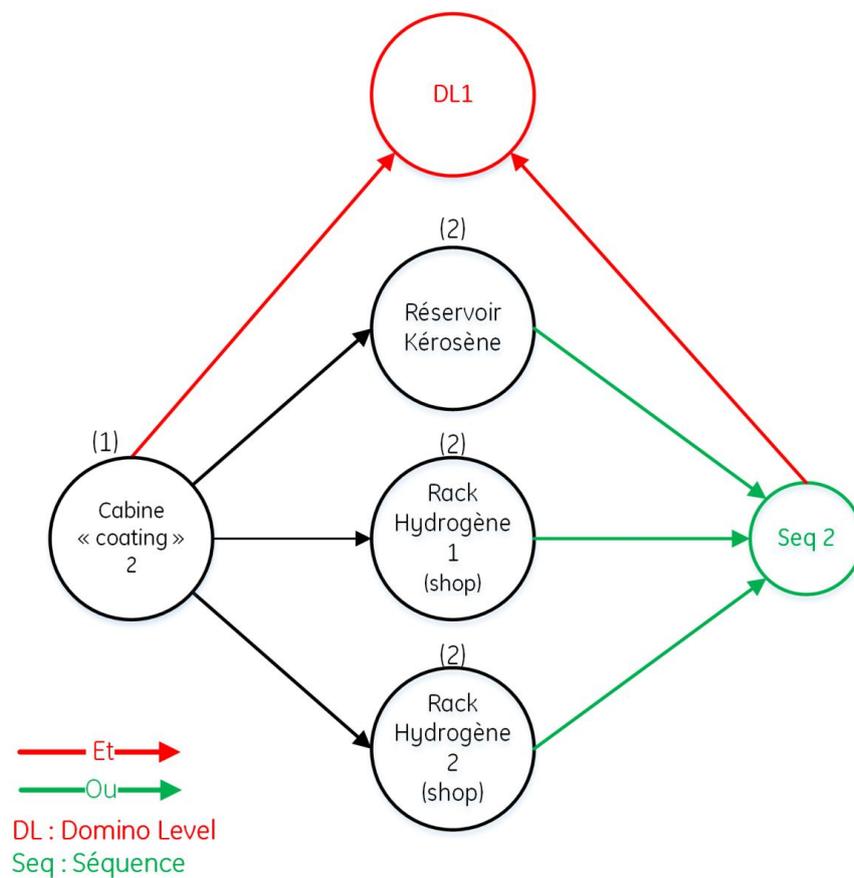


Figure 2.22 Réseau Bayésien de l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°2 ».

II.3.2.2. Sélection de l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique»

La QRA va être appliquée à l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique ».

II.3.2.2.1.Sélection des effets et évaluation de la propagation

La simulation de la propagation de l'effet radiatif se fera en considérant que l'incendie se produit au niveau du réservoir de kérosène. Nous posons cette hypothèse car l'incendie se répondra rapidement de la station de coating au réservoir via les flexibles. Donc l'équipement qui alimentera l'événement primaire et représente le point de départ de la propagation est le réservoir de kérosène.

Les équipements se trouvant à proximité de la zone incendiée sont les racks d'H₂. Afin de déterminer l'intensité de radiation au niveau de ce dernier, une simulation par le logiciel PyroSim® est nécessaire afin de déterminer la valeur de l'intensité radiative et de la comparer aux valeurs seuils d'escalade.

Les paramètres entrés dans le logiciel sont les suivants : [17]

- Réaction de combustion du kérosène.

Tels que : (Hurley, et al., 2016)



Où :

$$\nu_{O_2} = 18.349372$$

$$\nu_{CO_2} = 11.329040$$

$$\nu_{CO} = 0.073838$$

- Température critique de la flamme, $T_c = 1650^\circ C$
- HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area) du kérosène, $HRRPUA=8000 \text{ kW.m}^{-2}$
- Enthalpie de combustion, 43200 kJ.kg^{-1} .
- Plan horizontal placé à 1,25 m de hauteur, afin de visualiser la distribution de la température au niveau des racks d'H₂.

Pour définir les conditions météorologiques nous avons utilisé la rose des vents de Boufarik, qui renseigne sur la direction du vent durant une année. D'après la figure 2.23 le

vent souffle durant la plus grande partie de l'année dans la direction ENE (Est Nord Est), nous allons donc sélectionner cette condition dans PyroSim® pour une vitesse de 1.5 et 5 m.s⁻¹ et une température de 15 et 35°C.

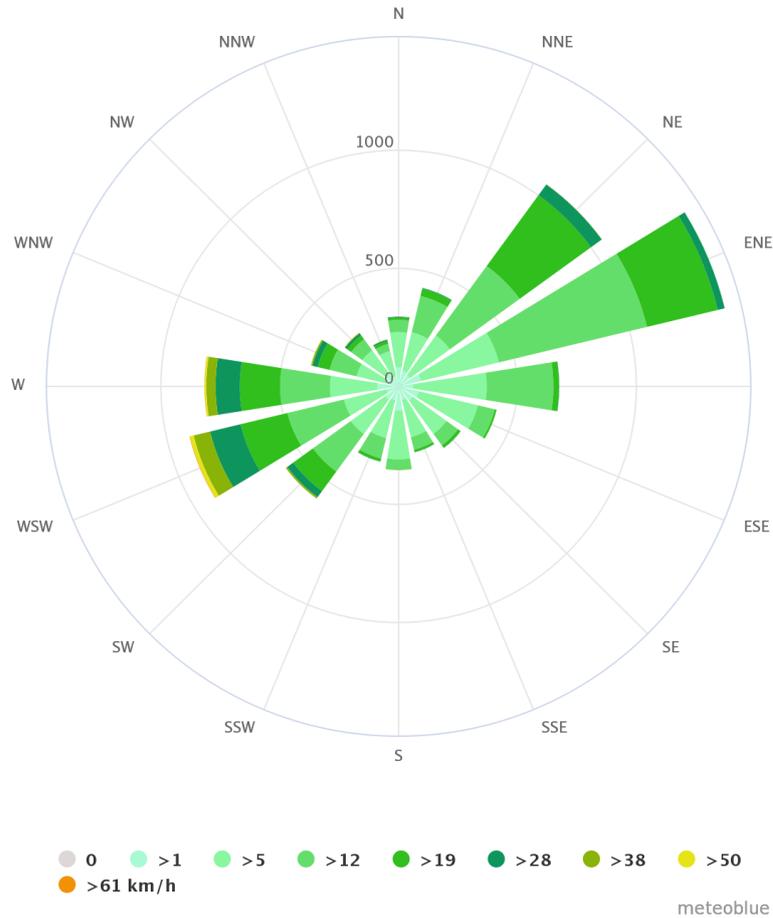


Figure 2.23 Rose des vents de Boufarik [23]

Résultats de la simulation :

La simulation nous a permis de visualiser la variation de température en fonction du temps au niveau du réservoir de kérosène et des racks d'H₂. La figure 2.24 représente la visualisation obtenue à t = 5 min et pour la condition météorologique : T = 35°C avec une vitesse du vent de 1.5 m.s⁻¹.

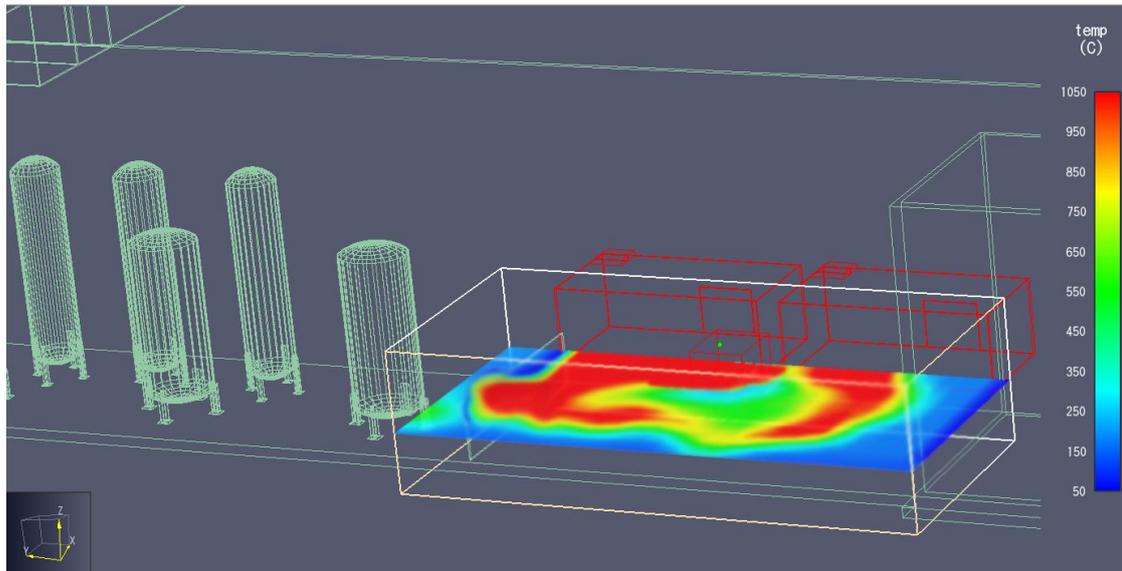


Figure 2.24 Visualisation de la température à $t = 5 \text{ min}$ et $H = 1.25 \text{ m}$, pour la condition météorologique $T = 35^\circ\text{C}$, vitesse du vent = 1.5 m.s^{-1}

En plaçant un capteur de température au niveau des racks d' H_2 nous pouvons relever la température toute les 2 min afin de calculer la température moyenne de la surface des racks durant 10 min. Ainsi, en appliquant la loi de Stephan-Boltzmann nous sommes en mesure de calculer l'intensité de radiation thermique

Tel que :

$$I = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.15)$$

Où :

I : intensité de radiation thermique (W.m^2)

E : coefficient d'émissivité compris en 0 et 1. Pour l'acier inoxydable (matériau dont est constitué la bouteille d' H_2) il varie de 0.54 à 0.63, nous le prendrons égale à 0.59

σ : constante de Stephan-Boltzmann, égale à $5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T : température de la surface du rack (K)

Les résultats obtenus pour les différentes conditions météorologiques sont illustrés dans le tableau 2.19

Tableau 2.19 Résultats extraits de PyroSim® pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station thermique »

Conditions météo		T _{moy} à la surface des racks (°C)	I (kW.m ⁻²)
T ambiante (°C)	Vitesse du vent (m.s ⁻¹)		
35	1.5	850	53.205
	5	865	56.105
15	1.5	810	46.020
	5	815	46.876

II.3.2.2.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

Les conditions météorologiques qui donnent lieu à une escalade de l'événement primaire sont toutes conditions qui permettent d'obtenir une valeur de I supérieur ou égale à 50 kW.m⁻² durant 10 min et qui sont en l'occurrence les conditions de 35°C pour des vitesses du vent de 1.5 et 5 m.s⁻¹. Pour les autres conditions il n'y aura pas d'effet domino car aucune cible n'est atteinte par une intensité de radiation suffisante.

La probabilité d'escalade et la fréquence de l'effet domino de premier niveau pour chaque condition météorologique sont données dans le tableau 2.20.

Tableau 2.20 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique »

Conditions météorologiques		Vecteur d'escalade	Cible		I (kW.m ⁻²)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		P _{ij}	F _{ed1} (ans ⁻¹)
T ambiante (°C)	Vitesse du vent (m.s ⁻¹)		Equipements	Type			Expression	Y _{ij}		
35	1.5	Radiation thermique	Racks d'H ₂ au niveau de la zone de stockage	Pressurisé	53.205	50 kW.m ⁻²	Y _{ij} = 12.54 – 1.847 ln (ttf)	4.248	0.226	1.5x10 ⁻⁹
	5				56.105		ln (ttf) = - 0.95 ln (I _{ij}) + 8.845V ^{0.032}	4.341	0.254	1.656x10 ⁻⁹

II.3.2.2.3. Détermination des scénarios secondaires

Le scénario secondaire retenu, pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique » est : Explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage. Et cela pour une condition météorologique de 35°C et une vitesse du vent de 1.5 et 5 m.s⁻¹

II.3.2.2.4. Deuxième niveau de l'étude : Identification des événements secondaires

L'événement secondaire donnant lieu à une escalade est l'explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage, Telle que : pour une vitesse du vent de 1.5 m.s⁻¹, $F_2 = 1.5 \times 10^{-9} \text{ ans}^{-1}$ et pour une vitesse du vent de 5 m.s⁻¹, $F_2 = 1.656 \times 10^{-9} \text{ ans}^{-1}$.

Comme nous avons déjà étudié la propagation de cet événement dans le titre II.3.2.1.5.1, les résultats obtenus par les simulations sont directement résumé dans le tableau 2.21. En sachant que : $F_{ed2} = F_2 \times P_{ij}$

Nous pouvons conclure également que le scénario tertiaire est : Rupture de la citerne d'O₂.

Tableau 2.21 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique »

Conditions météorologiques		Source	Vecteur d'escalade	Cible		ΔP (kPa)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_{ed2} (ans ⁻¹)
T ambiante (°C)	Vitesse du vent (m.s ⁻¹)			Equipement	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
35	1.5	Explosion des racks d'H ₂ dans la zone de stockage	Surpression	Citerne d'O ₂	Pressurisé	17.63	17 kPa	$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{i,j})$	-9.217	8.138x10 ⁻¹¹	1.221 x10 ⁻¹⁹
	5										1.348 x10 ⁻¹⁹

II.3.2.2.5. Troisième niveau de l'étude : Identification des événements tertiaires

Comme dit dans la section II.3.2.1.5.3, seule une estimation qualitative des dégâts dus à l'événement tertiaire (rupture de la citerne d'O₂) peut être faite.

II.3.2.2.6. Quatrième niveau de l'étude : Identification des événements quaternaire

L'effet de synergie entre l'événement secondaire « Explosion des racks d'H₂ dans la zone de stockage » et de l'événement tertiaire « Rupture de la citerne d'O₂ » peut donner lieu au scénario quaternaire « Rupture de la citerne d'Argon qui alimente le four N°2 (Ar_2) ». Par la suite, l'endommagement d'Ar_2 mènera à un 5^{ème} événement qui est la surchauffe du four.

Ce qui nous permet de conclure que l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique », engendre des effets dominos de 4^{ème} niveau.

II.3.2.2.7. Evaluation des scénarios dominos

Afin de modéliser la propagation probable des effets dominos de l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique », nous allons utiliser les réseaux Bayésiens. La schématisation du réseau est donnée dans la figure 2.25.

Chaîne domino : Incendie réservoir de kérosène → Explosion racks extérieurs d'H₂ → Rupture citerne O₂ → Rupture citerne Ar_2 → surchauffe four 2. (4 niveaux d'effets dominos)

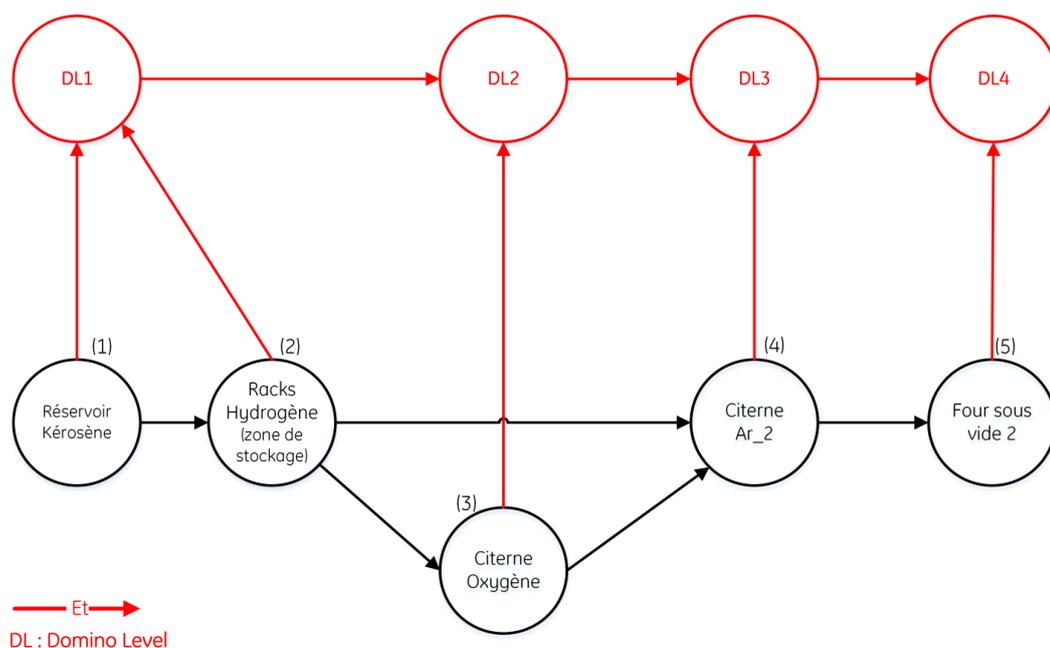


Figure 2.25 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique »

II.3.2.3. Sélection de l'événement primaire « Explosion du four sous vide »

Nous allons appliquer la QRA à l'événement primaire « Explosion du four sous vide ». En étudiant les deux cas possibles : explosion du four N°1 et explosion du four N°2.

II.3.2.3.1. Sélection des effets et évaluation de la propagation

Pour les deux cas (four 1 et four 2), la quantité d'H₂ qui explose est de 3 kg [16], le modèle utilisé pour la modélisation PHAST® est le modèle TNT.

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau 2.22.

Tableau 2.22 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide »

Combustible	Hydrogène
Quantité	3 kg
Condition météorologique	1.5/F
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimal	0
Distance maximal	100 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation de l'effet de surpression dans les deux cas (explosion four N°1 et explosion four N°2) sont représentés dans les figures 2.26 et 2.27.

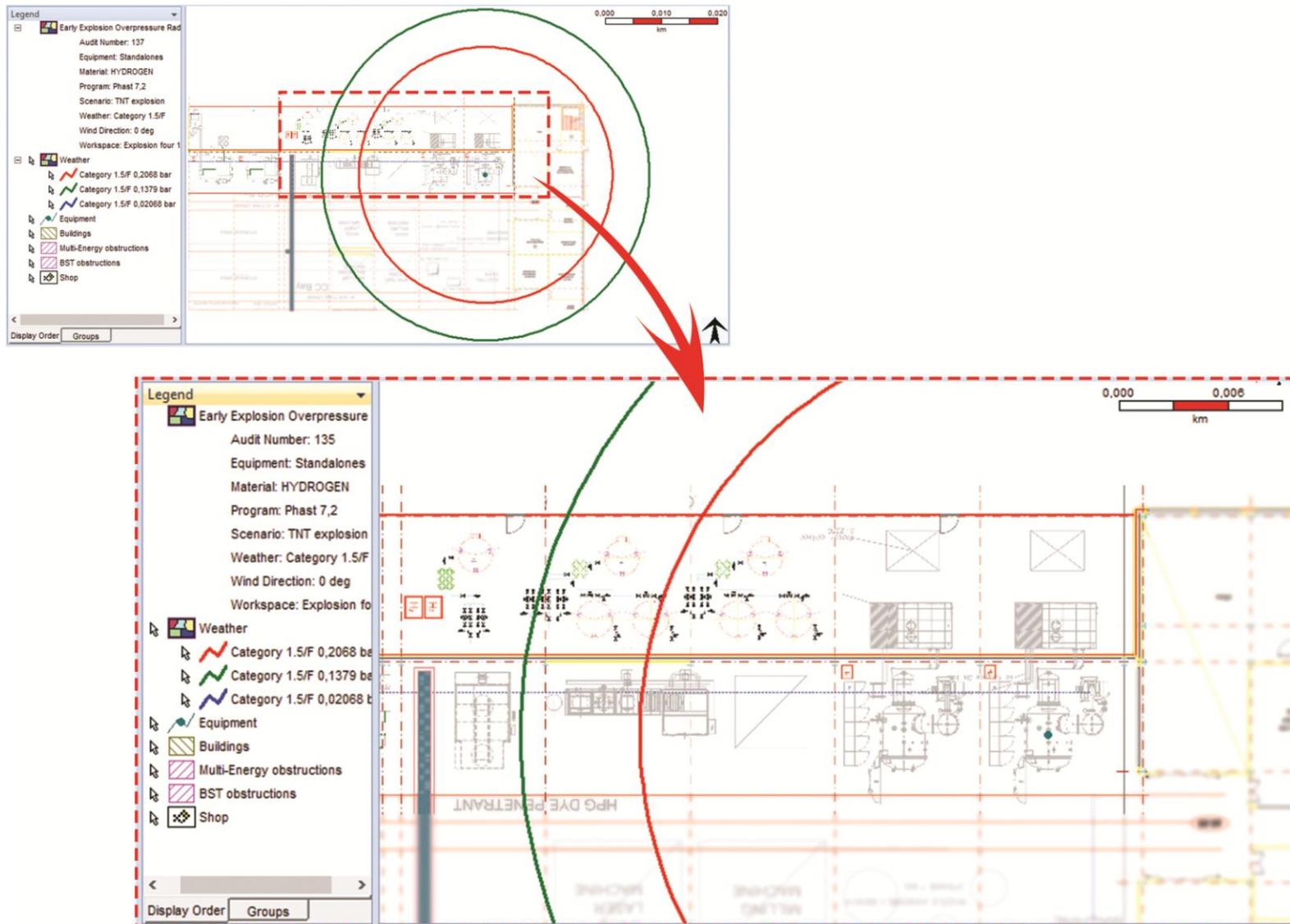


Figure 2.26 Propagation de l'effet de surpression pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide N°1 »

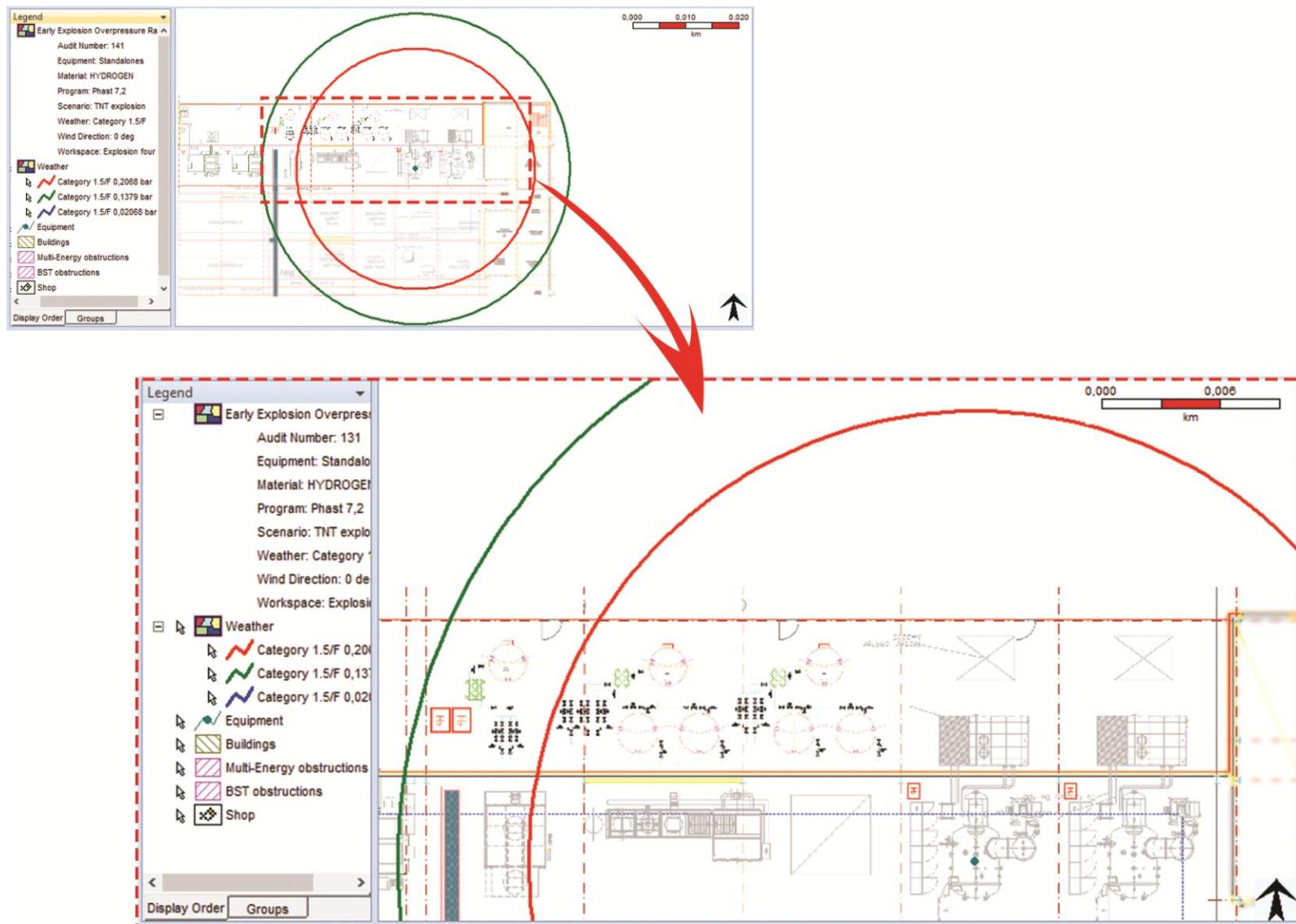


Figure 2.27 Propagation de l'effet de surpression pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide N°2 »

Interprétation des résultats :

La majorité des équipements de la zone étudiée sont détruits par l'explosion des fours. Les conséquences sont donc catastrophiques (destruction des murs en sandwich, des citernes de la zone de stockage, etc.)

Certes, par effet de synergie, d'autres événements peuvent suivre l'explosion des fours, comme par exemple l'explosion des racks d'H₂ de la zone de stockage, mais les conséquences seront moins importantes que l'événement primaire. Il n'y a donc pas d'effet domino de niveau 2.

Afin de calculer la fréquence de l'effet domino de niveau 1, il faut déterminer la probabilité d'escalade d'une cible. Etant donné que plusieurs cibles sont touchées simultanément par l'événement primaire, nous allons choisir la cible ayant la probabilité d'escalade la plus élevée.

Nous savons que pour des équipements de même type (atmosphérique ou pressurisé), la probabilité d'escalade sera plus grande pour l'équipement le plus proche de l'épicentre de l'explosion.

De la simulation PHAST® nous tirons deux cibles potentielles :

- Le rack d'H₂ (intérieur du shop), telle que $d = 4.20 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$
- Le réservoir à eau, telle que $d = 4.60 \text{ m} \rightarrow \Delta P = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$

Le même résultat est obtenu pour les deux explosions car les racks d'H₂ et les réservoirs à eau sont disposés à égale distance.

II.3.2.3.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

La probabilité d'escalade de l'événement primaire « Explosion du four sous vide » ainsi que la fréquence de l'effet domino de premier niveau sont données dans le tableau 2.23. Nous constatons que la probabilité d'escalade la plus élevée est celle correspondante à la cible « Réservoir à eau ».

Tableau 2.23 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide »

Source	Vecteur d'escalade	Cible		ΔP (kPa)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		P_{ij}	F_{ed1} (ans ⁻¹)
		Equipements	Type			Expression	Y_{ij}		
Explosion du four sous vide	Surpression	Rack d'H ₂ (25 L)	Pressurisé	100	17 kPa	$Y_{ij} = - 14.44 + 1.82 \ln (\Delta P_{ij})$	-6.059	1.417×10^{-8}	8.407×10^{-9}
		Réservoir à eau	atmosphérique	100	22 kPa	$Y_{ij} = - 9.36 + 1.43 \ln (\Delta P_{ij})$	-2.775	3.033×10^{-6}	

II.3.2.3.3. Détermination des scénarios secondaires

Les scénarios secondaires retenus, pour l'événement primaire « Explosion du four sous vide » sont :

- Destruction du four 1.
- Destruction de la zone de stockage.

Etant donné que les conséquences du scénario primaire sont plus catastrophiques que celles engendrées par les scénarios secondaires, l'étude s'arrête à ce niveau 1. Comme les scénarios secondaires sont simultanés, il est inutile d'utiliser les réseaux Bayésien pour évaluer l'effet domino. Car nous avons qu'une seule séquence domino qui est catastrophique et détruit tous les équipements situés dans un rayon de 30m.

La valeur de la fréquence de l'effet domino de niveau 1 est égale à : $F_{ed1} = 8.407 \times 10^{-9} \text{ ans}^{-1}$

II.3.2.4. Sélection de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide »

Nous allons appliquer les étapes de la QRA à l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide ».

II.3.2.4.1. Sélection des effets et évaluation de la propagation

Etant donné que nous ne disposons pas de la réaction de combustion à l'origine de l'incendie du four sous vide, nous ne pouvons pas simuler l'incendie avec le logiciel PyroSim®.

Cela dit, nous ne pouvons pas n'en plus exclure ce scénario car il a le potentiel d'engendrer des effets dominos. Nous avons donc pris le cas défavorable où la cible se trouvant à proximité immédiate est soumise à une intensité de radiation de 50 kW.m², qui est la valeur seuil d'escalade.

Nous distinguons deux cas : incendie du four N°1 et incendie du four N°2.

- a- L'incendie se produit au niveau du four N°1 : L'équipement se trouvant à proximité est le rack N°1 d'H₂
- b- L'incendie se produit au niveau du four N°2 : Les équipements se trouvant à proximité sont les racks N°1 et N°2 d'H₂. Comme les racks sont à égale distance du four, ils ont donc la même probabilité d'escalade.

II.3.2.4.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

Les résultats du calcul de la probabilité d'escalade et de la fréquence de l'effet domino de niveau 1 pour l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide » sont donnés dans le tableau 2.24.

Tableau 2.24 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau pour l'événement primaire « Incendie du four sous vide »

Source	Vecteur d'escalade	Cible		I (kW.m ⁻²)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		P _{ij}	F _{ed1} (ans ⁻¹)
		Equipements	Type			Expression	Y _{ij}		
Incendie fours sous vide N°1	Radiation thermique	Rack N°1 d'H ₂ (25 L)	Pressurisé	50	50 kW.m ⁻²	Y _{ij} = 12.54 – 1.847 ln (tff) ln (tff) = - 0.95 ln (I _{ij}) + 8.845V ^{0.032}	4.139	0.197	2.837x10 ⁻⁵
Incendie fours sous vide N°2	Radiation thermique	Rack N°1 d'H ₂ (25 L)	Pressurisé	50	50 kW.m ⁻²	Y _{ij} = 12.54 – 1.847 ln (tff) ln (tff) = - 0.95 ln (I _{ij}) + 8.845V ^{0.032}	4.139	0.197	2.837x10 ⁻⁵
		Rack N°2 d'H ₂ (25 L)							

II.3.2.4.3. Détermination des scénarios secondaires

Le scénario secondaire susceptible de se produire après un incendie au niveau de l'un des fours sous vide est : l'explosion des racks d'H₂ d'une capacité de 25 L chacun et se trouvant pré des fours.

La fréquence de l'événement secondaire «Explosion du rack d'H₂ pré du four» est égale à la fréquence de l'effet domino de niveau 1, $F_2 = 2.837 \times 10^{-5} \text{ ans}^{-1}$

II.3.2.4.4. Deuxième niveau de l'étude : Identification des événements secondaires

Nous allons réitérer les mêmes étapes pour l'événement secondaire : «Explosion du rack d'H₂ pré du four » afin de déterminer les scénarios tertiaires.

II.3.2.4.4.1. Sélection des effets et évaluation de la propagation

Nous étudions l'explosion du rack 1 ainsi que l'explosion du rack 2.

Sachant que le rack contient 5 bouteilles d'H₂ d'une capacité de 5L chacune

$$\Rightarrow V_{H_2} = 25 \text{ L} = 0.025 \text{ m}^3$$

On aura : $m_{H_2} = 2.247 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Pour la modélisation PHAST®, le modèle TNT est utilisé. Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau 2.25.

Tableau 2.25 Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement secondaire « Explosion du rack d'H₂ pré du four » dû à l'événement primaire « Surchauffe du four sous vide »

Combustible	Hydrogène
Quantité	$2.247 \times 10^{-3} \text{ kg}$
Condition météorologique	1.5/F
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimal	0
Distance maximal	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation de l'effet de surpression dans les deux cas (explosion rack 1 d'H₂ et explosion du rack 2 d'H₂) sont représentés dans les figure 2.28 et 2.29.

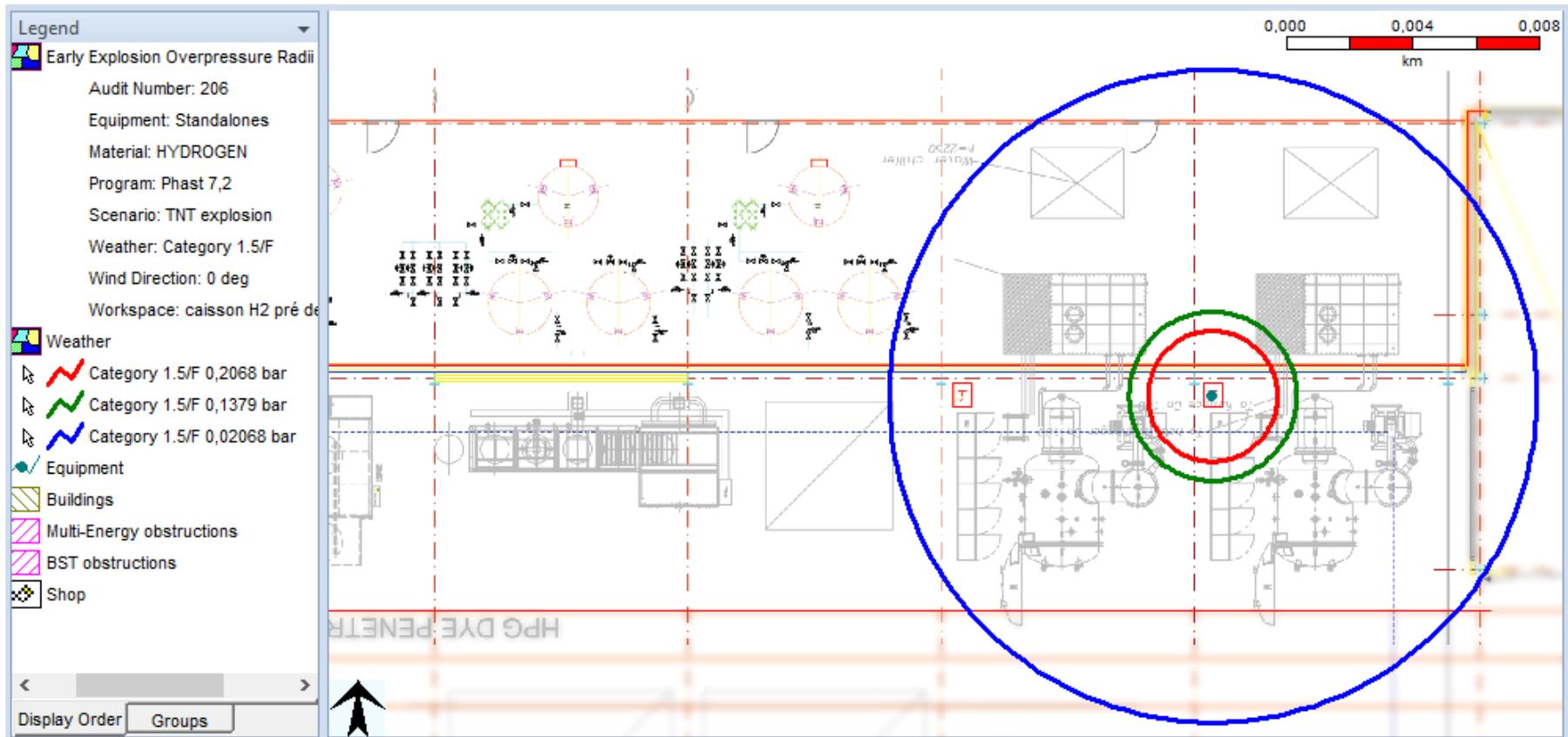


Figure 2.28 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire « Explosion du rack 1 d'H₂ pré du four » suite à l'événement primaire « surchauffe du four sous vide »

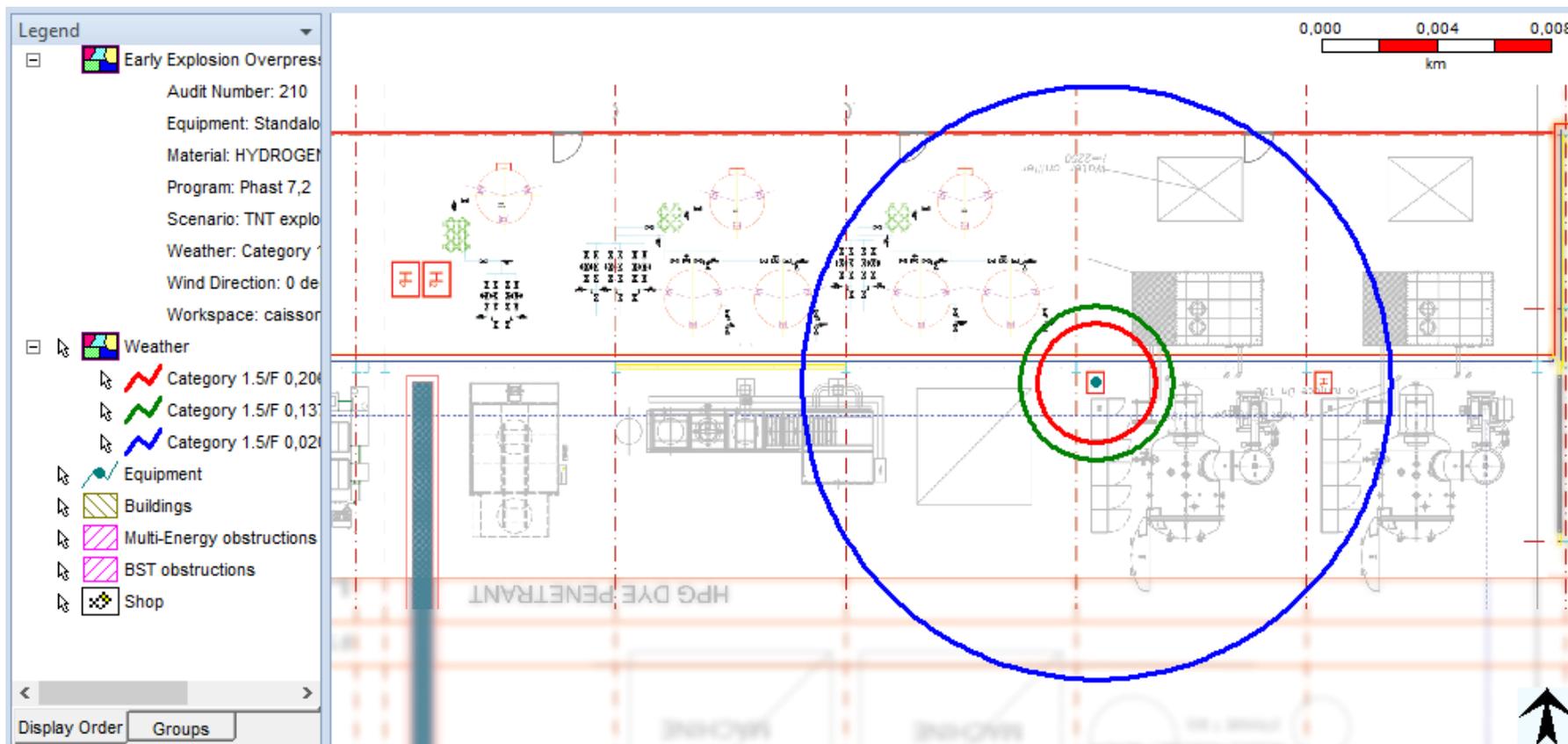


Figure 2.29 Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire « Explosion du rack 2 d'H₂ pré du four » suite à l'événement primaire « surchauffe du four sous vide »

Interprétation des résultats :

Dans les deux cas, l'explosion ne générera pas d'escalade, car aucun autre équipement ne se trouve dans le périmètre des deux rayons de surpression de 0.13 et 0.20 bar. Les explosions auront comme conséquence la destruction du mur en sandwich séparant le shop de la zone de stockage.

L'équipement qui se trouve à proximité immédiate du mur détruit est un réservoir à eau, donc même s'il est touché par les débris ça ne causera pas de conséquences plus graves que celles de l'événement secondaire. Nous pouvons donc en conclure que l'effet domino s'arrêtera à ce deuxième niveau.

Donc l'explosion des racks d'H₂ se trouvant à proximité des fours ne générera pas d'effet domino de 3^{ème} niveau. Cela dit, afin de calculer la fréquence de l'effet domino de niveau 2 il va falloir calculer la probabilité d'escalade au niveau du réservoir à eau.

La cible se trouve à une distance de 1.40 m de l'épicentre de l'explosion (même distance pour les deux cas). En s'appuyant sur le rapport extrait de PHAST®, $\Delta P=0,384 \text{ bar}=38.4 \text{ kPa}$.

II.3.2.4.4.2. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

La probabilité d'escalade de l'événement secondaire « Explosion du rack d'H₂ pré du four » ainsi que la fréquence de l'effet domino de deuxième niveau sont données dans le tableau 2.26. Telle que $F_{ed2} = F_2 \times P_{i,j}$

Tableau 2.26 Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau pour l'événement secondaire « Explosion rack d'H₂ pré du four » dû à l'événement primaire « Surchauffe du four sous vide »

Source	Vecteur d'escalade	Cible		ΔP (kPa)	Valeur seuil d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_{ed2} (ans ⁻¹)
		Equipement	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
Explosion Rack d'H ₂	Surpression	Réservoir à eau	atmosphérique	38.4	22 kPa	$Y_{i,j} = - 9.36 + 1.43 \ln (\Delta P_{i,j})$	-4.143	3.245×10^{-7}	9.206×10^{-12}

II.3.2.4.4.3. Détermination des scénarios tertiaires

Le scénario tertiaire retenu, pour l'événement secondaire « Explosion du rack N°1 d'H₂ », est la rupture du réservoir à eau 1. Quant au scénario tertiaire retenu, pour l'événement secondaire « Explosion du rack N°2 d'H₂ », c'est la rupture du réservoir à eau 2.

L'étude de l'événement primaire « Incendie du four sous vide » s'arrête à des effets dominos de niveau 2.

II.3.2.4.5. Evaluation des scénarios dominos

Afin de modéliser la propagation probable des effets dominos de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide », nous utilisons les réseaux Bayésiens.

Nous distinguons deux cas :

- a. L'incendie se produit au niveau du four N°1

La figure 2.30 correspond au réseau Bayésien constitué par l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°1 ».

Chaîne domino : Incendie four sous vide 1 → Explosion rack 1 d'H₂ → Rupture réservoir 1 à eau. (2 niveau d'effets dominos)

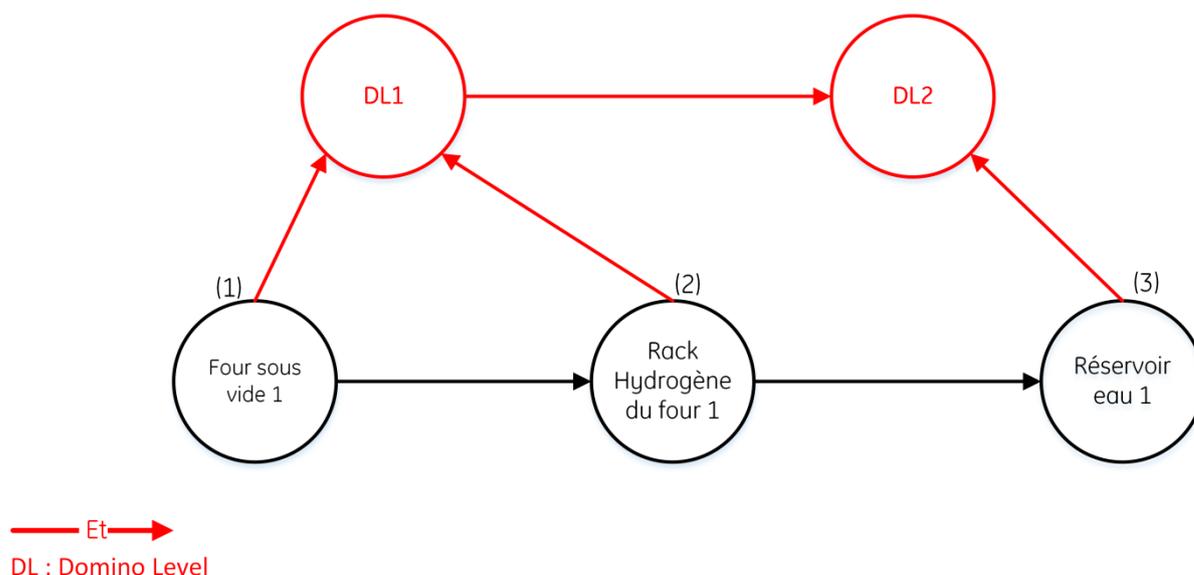


Figure 2.30 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°1 ».

b. L'incendie se produit au niveau du four N°2 :

La figure 2.31 correspond au réseau Bayésien constitué par l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°2 ».

Nous distinguons deux cas :

Chaîne domino 1 : Incendie four sous vide 2 → Explosion rack 1 d'H₂ → Rupture réservoir 1 à eau. (2 niveau d'effets dominos)

Chaîne domino 2 : Incendie four sous vide 2 → Explosion rack 2 d'H₂ → Rupture réservoir 2 à eau. (2 niveau d'effets dominos)

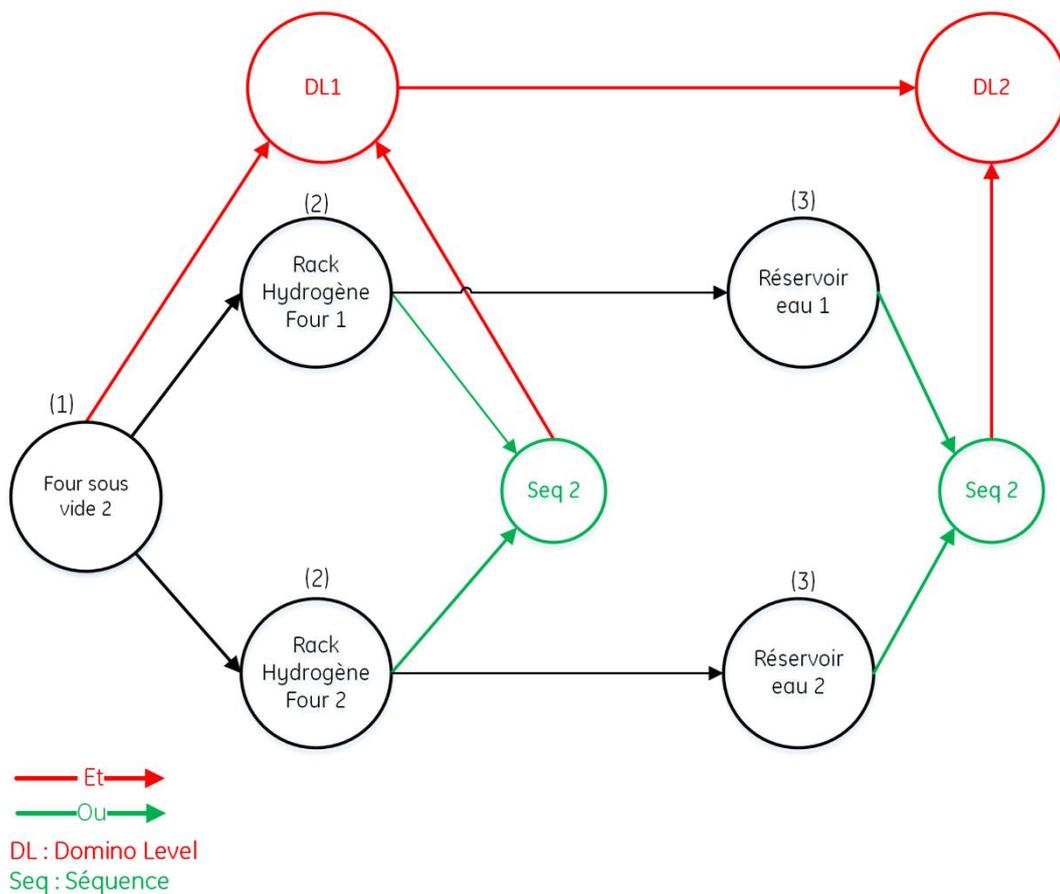


Figure 2.31 Réseau Bayésien de l'événement primaire « Incendie au niveau du four sous vide N°2 ».

II.3.2.5. Calcul des indices de risques

Comme il a été expliqué dans la section II.2.1.10 et l'annexe IV, l'acceptation du risque dépend de plusieurs éléments dont le risque sociétal et le risque individuel sont les plus

significatifs. La dernière étape de la QRA consiste à calculer et représenter ces deux indices, indispensables pour la prise de décision concernant l'acceptation de risque.

Les indices de risques sont plus significatifs et donnent plus d'information lorsqu'ils sont appliqués à un cas où la population touchées et la propagation sont importantes.

Pour cette raison, nous allons représenter ces indices pour un seul cas : la propagation du VCE au niveau de la cabine de coating N°1, où le niveau des effets dominos est le plus grand. Pour les autres cas, les indices de risques sont moins significatifs.

II.3.2.5.1. Risque individuel

La figure 2.32 représente le contour du risque individuel pour la propagation de l'évènement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».

En comparant les valeurs de surpression obtenues avec le premier seuil des effets de surpression sur l'homme (voir tableau 2.4), nous avons pu déterminer les contours des zones où une personne au minimum serait touchée.

- Les pointillés en rouge correspondent à la zone où la fréquence qu'une personne au minimum soit touchée par les effets dominos de niveau 1 et 2 est de $6,865 \times 10^{-16}$. La fréquence du 2eme niveau n'apparaît pas sur la carte car le contour de ses effets est inclus dans celui de l'évènement primaire.
- Les pointillés en bleu, représente le contour de la zone correspondante à la fréquence qu'une personne au minimum soit touchée par un effet domino du niveau 3. Cette fréquence est de $2,035 \times 10^{-35}$.

Donc, à travers ces contours de risque individuel, la fréquence de risques auxquels une personne est exposée est mieux représentée.

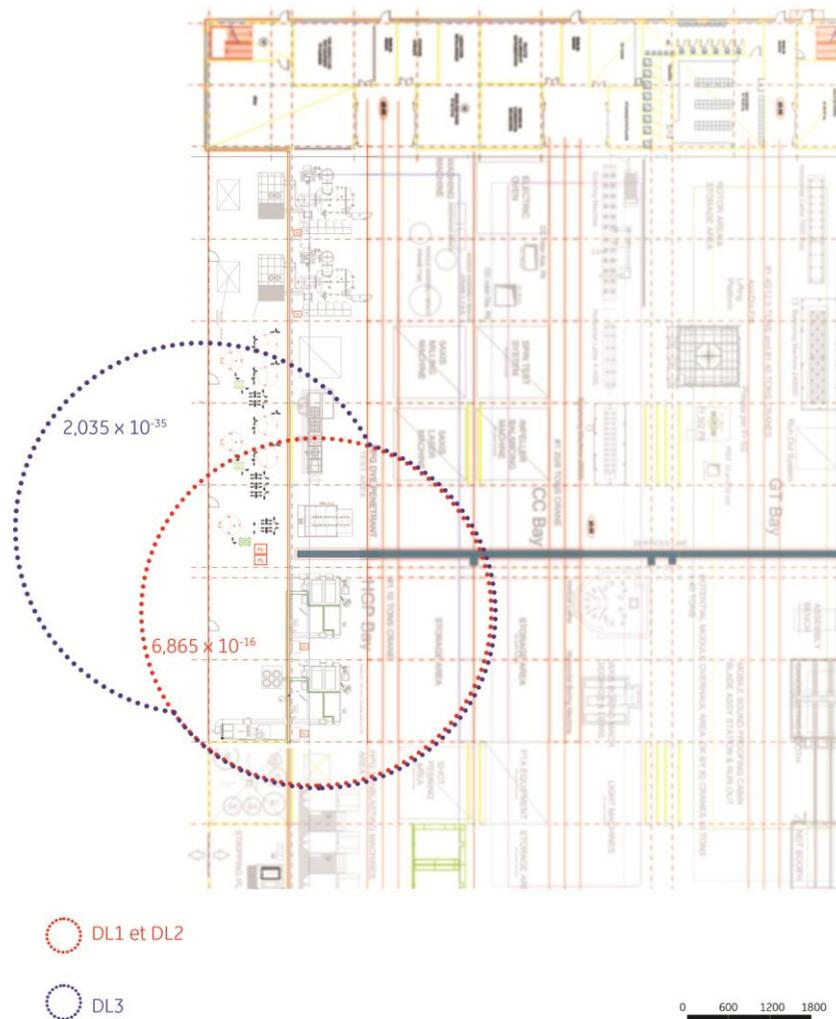


Figure 2.32 contour du risque individuel correspondant à la propagation du VCE au niveau de la cabine de coating N°1

II.3.2.5.2. Risque sociétal

Les effets dominos ont tendance à toucher un grand nombre de personnes directement ou indirectement. C'est pourquoi, l'estimation des personnes exposées est importante même si la fréquence est très faible.

Le tableau représente la fréquence domino de chaque niveau et la fréquence cumulée.

Tableau 2.27 Fréquence domino de chaque niveau et la fréquence cumulée pour l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 »

Evènements dominos (E)	Nombre de personnes exposées (N)	Fréquence (f)	Fréquence cumulée (F _c)
E _{d3}	100	$f_{d3} = 2,035 \times 10^{-35}$	$2,035 \times 10^{-35}$
E _{d2}	25	$f_{d2} = 2,198 \times 10^{-22}$	$2,198 \times 10^{-22}$
E _{d1}	25	$f_{d1} = 6,865 \times 10^{-16}$	$6,865 \times 10^{-16}$

Dans notre étude, les fréquences des événements dominos diminuent lorsque le niveau de propagation augmente. Sachant que les fréquences sont très faibles, il est évident que la fréquence cumulée de chaque événement reste inchangée lorsqu'elle est sommée avec la précédente.

La fréquence cumulée est utilisée pour faire apparaître le nombre minimal de personnes touchée par chaque effet domino. Le nombre de personnes exposées a été estimé en calculant le nombre de personne se trouvant dans les zones du risque individuel déterminées précédemment.

Les résultats sont représentés par un graphe donné dans la figure 2.33. La lecture de ce graphe nous permet de tirer directement le nombre minimal de personnes exposées aux effets de l'accident domino généré par l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ».

Par exemple, pour une fréquence de $6,865 \times 10^{-16}$, 25 personnes au minimum seront exposées aux effets.

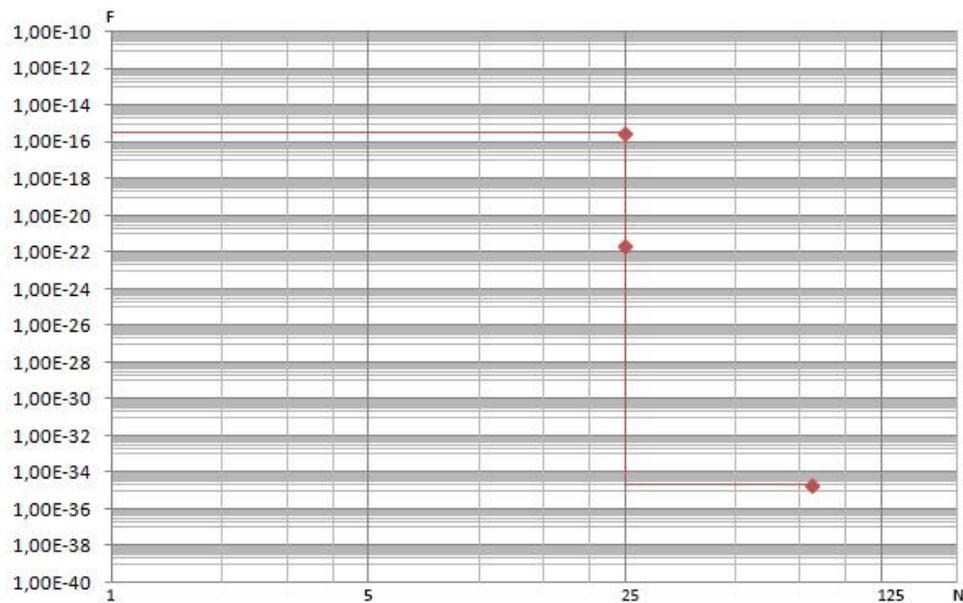


Figure 2.33 graphe représentant les fréquences cumulées en fonction de personne exposées.

A travers ces deux indices, les analyses des risques, notamment, les risques liés aux effets dominos, seront plus précises et plus concrètes. Car elles traitent les effets sur les personnes individuellement puis autant que groupe.

Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous avons pu identifier 7 événements primaires qui pourraient donner lieu à des accidents dominos.

L'événement primaire avec le scénario domino le plus long et complexe est le **VCE au niveau de la cabine de coating N°1**, où l'effet domino atteint le 5^{ème} niveau. Puis vient l'événement primaire **pool fire au niveau de la station de coating**, qui cumule 4 niveaux dominos. Ensuite, l'**incendie déclenché par les fours sous vide**, chacun d'entre eux génère des effets dominos de niveau 2. Pour finir, le **VCE au niveau de la cabine de coating N°2** et l'**explosion des fours** donnent lieu à un seul niveau domino.

Il est important de relever que l'explosion de l'un des fours reste une séquence critique car l'explosion primaire en elle-même est catastrophique et détruirait tout ce qu'il y a sur le site d'ALGESCO dans un rayon de 30m et entrainerait par effet de synergie la destruction du reste des équipements encore debout.

Le calcul des fréquences de chaque effet domino a été fait dans l'optique de représenter deux indices de risque : risque sociétal et risque individuel. Nous avons étudié le cas du VCE dans la cabine de coating N°1.

Les résultats de l'étude des effets dominos nous permettent d'entamer la deuxième partie de ce travail. A travers l'évaluation des moyens mis en place par ALGESCO, nous allons déterminer si elle est en mesure de faire face aux accidents à effets dominos. Ensuite, nous proposerons des moyens pour optimiser la surveillance des process à haut risque pour éviter l'escalade des événements primaires.

Deuxième partie

**Optimisation du service d'intervention et
des moyens de surveillances des paramètres
critiques des process à haut risque**

Chapitre III

Optimisation du service d'intervention d'ALGESCO

III. Optimisation du service d'intervention d'ALGESCO

Introduction

Nous entamerons notre deuxième partie de l'étude avec l'optimisation des services d'intervention d'ALGESCO, et cela en évaluant les moyens déjà mis en place par l'entreprise afin de déterminer si elle est en mesure de faire face aux accidents majeurs et plus précisément ceux à effet domino et proposerons des mesures d'amélioration de type organisationnel. Puis nous élaborerons une répartition des extincteurs sur l'ensemble de la superficie du site en nous basant sur la règle APSAD R4. Enfin nous conclurons ce chapitre par un modèle d'évacuation du personnel, en nous appuyant sur le logiciel Pathfinder®.

III.1. Moyens à mettre en place pour faire face aux accidents catastrophiques

Avec une bonne organisation et des moyens techniques de gestion efficaces, ALGESCO pourra faire face et maîtriser les risques majeurs. Pour se faire :

Elle devra être en mesure de prévenir les accidents catastrophiques tels que les accidents à effet domino et cela à travers l'anticipation, c'est-à-dire l'étude de tous les scénarios possibles afin de mettre en place les moyens de prévention optimaux.

Elle doit également atténuer les conséquences et arrêter la propagation des événements indésirables potentiellement destructeurs, en cas de survenus, à travers le renforcement des moyens d'intervention.

III.1.1. Planification de la Continuation des Activités (PCA)

Les niveaux d'intensité des accidents à effets dominos dépassant les prévisions et engendrant des conséquences catastrophiques non-envisagées les différencie des autres accidents.

Par conséquent, une planification efficace de la continuité des activités est un aspect essentiel de la gestion des effets dominos.

L'objectif stratégique fondamental de la PCA est d'assurer la survie et la viabilité de l'entreprise lorsque ses profits et sa prospérité sont menacés.

Elle repose sur les points suivants :

- Etudier les différents scénarios d'accidents dont l'entreprise pourrait être victime.

- Agir de manière structurée en cas d'accidents majeurs, à travers la préparation de la logistique et des procédures d'intervention adéquates.
- Mettre en place une communication efficace pour éviter l'incompréhension du personnel et la propagation de la panique.
- Identifier à l'avance, les personnes ayant les connaissances et l'expertise nécessaire pour gérer les situations de crise.

Ainsi, faire face à un événement domino, c'est répondre aux questions suivantes :

1. Quels dispositifs et moyens de gestion devraient être déployés ?
2. Quelles personnes devraient être impliquées ? Quelles sont les responsabilités de chacune d'elles ?
3. Quelle logistique doit être mise en place ?
4. Quelle communication mettre en place ?
5. Quelles procédures et quelles opérations devraient être mises en œuvre pour réduire l'impact de l'accident et procéder au redémarrage des activités ?

La prise de décisions sur la gestion des risques d'accidents à effet domino devra donc être bien réfléchie afin de mettre en place une stratégie d'intervention. Elle devra également porter sur le principe de la **pro-action** et la **réaction**.

III.1.2. Comment se prémunir des accidents à effets dominos

L'accident à effet domino étant le résultat de la propagation d'un événement primaire non désiré, sa prévention revient à la mise en place de moyens de prévention des événements primaires, mais dans le cas où un événement primaire se produit, il est nécessaire de déployer un service d'intervention interne performant afin d'éviter la propagation de ce dernier.

Des moyens de prévention optimaux pour prévenir de la survenue d'événements redoutés ont été proposés suite à des analyses de risques des process à haut risque menées auparavant [15][16][17]. Le tableau 3.1 résume ces moyens de prévention/protection.

Tableau 3.1 Moyens de prévention/protection des risques majeurs des process à haut risque proposé par les études antérieures

Unité à haut risque	Moyens de prévention/protection proposés
Zone de stockage	-Système automatique de régulation de pression.
Fours sous vide	-Mise en place d'un Système Instrumenté de Sécurité (SIS) pour réduire la probabilité du risque de défaillance de l'électrovanne d'hydrogène. -Dimensionnement d'un mur anti déflagration en béton armé de 25 cm d'épaisseur afin de protéger les ingénieurs qui travaillent à proximité du four sous vide. -Modification du plan maintenance, en ajoutant des vérifications complémentaires à celles déjà existantes.
Revêtement thermique	-Proposition de 4 SIS (3 pour la prévention de l'occurrence des fuites externes du kérosène et d'hydrogène et 1 pour la protection en cas d'incendie. -Mise en place d'un positif de désenfumage

Dans ce qui suit, l'accent sera mis sur les moyens d'intervention à mettre en œuvre pour lutter contre la propagation des évènements primaires et assurer une intervention interne rapide et efficace.

III.2. Evaluation du service d'intervention incendie d'ALGESCO

Dans le document PRSU (Procédure de Réponse aux Situations d'Urgence) élaboré par ALGESCO, il est considéré comme situation d'urgence :

- L'incendie,
- L'explosion,
- Le tremblement de terre,
- Le déversement de produits chimiques,
- L'urgence d'ordre médical.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons aux situations qui donneraient lieu à des incendies, car l'incendie constitue le point de départ de la majorité des accidents à effet dominos étudiés dans le chapitre précédent. C'est pour cela que nous nous baserons sur

l'APSAD R6 (édition de 2009) qui regroupe les règles d'organisation du service de sécurité incendie afin d'évaluer le service d'intervention d'ALGESCO et les différents moyens déployés dans ces situations.

Cette évaluation nous permettra de statuer sur la conformité de l'entreprise en matière d'intervention face aux risques d'incendies tout en proposant des mesures d'amélioration.

III.2.1. Présentation de l'APSAD R6

L'APSAD R6 est une règle d'organisation pour la maîtrise du risque incendie. Elle fixe les exigences relatives aux missions, à la composition et à la formation des différentes équipes d'intervention, ainsi qu'aux moyens matériels nécessaires à la lutte contre l'incendie.

Cette règle, d'application volontaire, est destinée à tous les exploitants, usagers, organismes, consultants ou assureurs, qui souhaitent s'assurer de la pertinence et de la qualité de l'organisation permettant la maîtrise du risque incendie.

III.2.2. Moyens dont dispose l'entreprise pour faire face aux incendies

L'intervention se doit d'être coordonnée et la stratégie d'intervention incendie doit être définie en prenant en compte :

- Les scénarios d'incendie identifiés par les analyses de risques,
- L'évacuation des occupants,
- Les moyens humains et matériels mobilisables pour l'intervention interne,
- Les délais d'intervention des secours extérieurs.

III.2.2.1. Moyens matériels

Afin d'évaluer le service d'intervention d'ALGESCO et de proposer des mesures d'amélioration, l'inventaire des moyens humains et matériels actuels est réalisé. L'inventaire des moyens matériels réservés à l'intervention incendie est donnée dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Moyens matériels à disposition d'ALGESCO pour l'intervention contre les incendies

	Type	Capacité	Nombre
Chariots	Poudre	50 kg	5
	CO ₂	10 kg	11
Extincteurs	Eau	9 L	3
	CO ₂	14 kg	14
		2 kg	10
	Poudre	9 kg	16
		6 kg	4
RIA	-	-	16

Il est à noter que les extincteurs ont été placés sur le site en ne suivant aucune règle, ce qui représente un véritable danger pour la sécurité des personnes et des installations. En effet, l'entreprise doit répartir les moyens de secours de telle façon à ce qu'ils puissent être mis rapidement en action, en tout point du site et particulièrement là où le risque d'incendies est le plus accru.

Pour palier à cet écart, la règle APSAD R4, sera appliquée afin de déterminer l'emplacement que les extincteurs mobiles devraient occuper.

Quant aux systèmes d'alarme, l'entreprise dispose à chaque sortie du shop, d'un système d'alarme incendie audible dans tous les secteurs où le personnel est susceptible d'être présent.

L'alerte, qui a pour but de prévenir les secours extérieurs, se fait au niveau du poste de garde qui la transmet par le biais d'un poste téléphonique relié au réseau public, ce qui est tout à fait conforme à ce qu'exige la règle APSAD R6.

III.2.2.2. Moyens humains

Au sein d'ALGESCO, le personnel du service de gardiennage est le seul responsable de l'intervention en cas d'accident. Ce service est constitué d'agents de sécurité formés sur l'utilisation des extincteurs, des RIA ainsi qu'aux premiers secours mais ne disposent d'aucune structure organisationnelle. Ils sont principalement postés au niveau de leur poste de

surveillance près des issues et du poste de garde se trouvant à l'entrée principale du centre de maintenance.

Cette disposition des agents n'est pas privilégiée car en cas de sinistre à l'intérieur du shop, le temps d'intervention sera plus long que s'il y avait des membres de l'équipe d'intervention présents un peu partout sur le site. C'est pour cela qu'il serait préférable de former plus de personnel à l'intervention.

III.2.3. Recommandation et mesures d'amélioration

La mission d'intervention englobe les premières actions ainsi que l'évacuation. Les premières actions correspondent au fait de :

- donner l'alarme,
- utiliser les moyens de secours à disposition pour éteindre ou contenir le début d'incendie,
- évacuer.

L'évacuation consiste à la mise en sécurité des occupants (salariés, visiteurs ...) et se doit d'être bien organisée afin d'être réalisée de façon rapide et efficace et aussi d'adapter les choix tactiques d'intervention en informant le plus rapidement possible les équipes d'intervention ou les secours extérieur sur :

- les éventuelles personnes manquantes aux points de rassemblement,
- les zones non vérifiées,
- l'impossibilité d'accès dans certaines zones.

Afin de gérer au mieux la mission d'intervention, des recommandations et mesures d'amélioration sont proposées.

III.2.3.1. Recommandation et mesures d'amélioration des moyens matériels

III.2.3.1.1. Disposition des extincteurs mobiles

Les informations qui doivent être prises en considération avant de déterminer l'emplacement des extincteurs mobiles sur le site seront détaillées dans ce qui suit.

Selon l'APSAD R4, il existe 3 types de protections :

- La protection générale,
- La protection complémentaire,
- La protection d'activités particulières.

III.2.3.1.1.1. La protection générale

Elle représente la protection de base à mettre en place dans des zones dites « zone de base » avec un nombre bien défini d'extincteur par zone et par mètre carré de surface et enfin, des dotations de base. Les directives à suivre sont données dans ce qui suit :

- a- Zone de base : elle est définie comme une zone à l'intérieur de laquelle :
 - est exercée le même type d'activité (industrielle, tertiaire),
 - existe la même classe de feu (A, B ou C) prédominante,
 - toutes les parties sont communicantes.

Le site d'ALGESCO regroupe les deux activités, industrielle (maintenance des turbines, zone de stockage, parking, laboratoire de métallurgie, etc.) et tertiaire (bureaux).

La figure 3.1, présente une répartition des zones de bases que nous préconisons pour le site.

Zone (1) : Magasin

Zone (2) : Partie statorique du shop

Zone (3) : Laboratoire de métallurgie

Zone (4) : Décapage chimique

Zone (5) : Partie rotorique du shop

Zone (6) : Bureaux rez-de-chaussée

Zone (8) : Stockage (gaz et kérosène)

Zone (9) : Stockage des déchets

Zone (10) : Groupe électrogène

Zone (11) : Parking

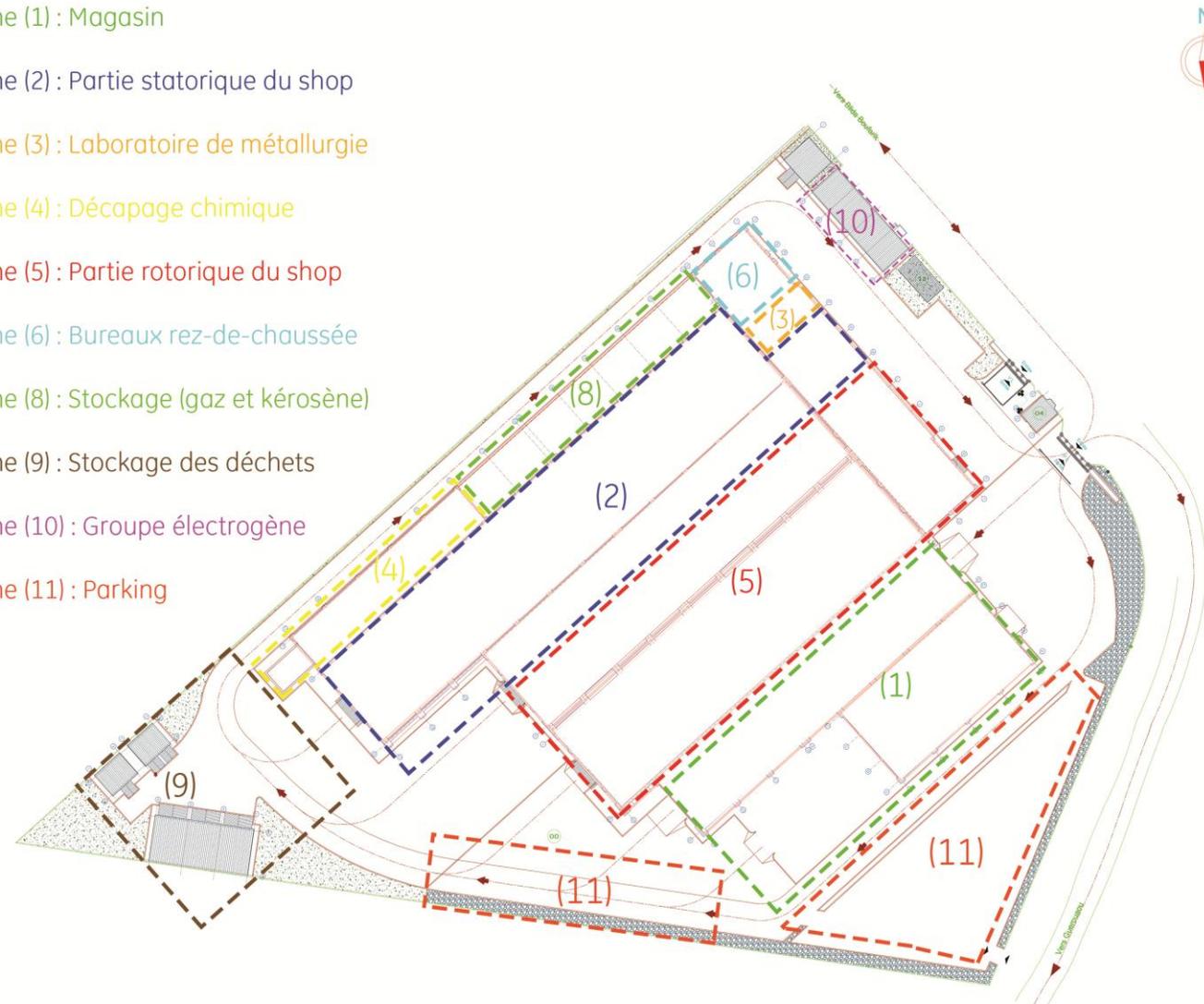


Figure 3.1. Répartition des zones au rez-de-chaussée

b- Unité de base : dans le cas d'ALGESCO et selon la disponibilité actuelle, on définit les unités de base suivantes :

Pour l'activité industrielle :

- 1 extincteur de 9 L d'eau **ou**,
- 1 extincteur de 9 kg poudre **ou**,
- 2 extincteurs de 6 kg CO₂.

Pour l'activité tertiaire :

- 1 extincteur poudre de 6kg **ou**,
- 5 extincteurs de 2kg CO₂

c- Dotation de base : chaque zone de base doit être dotée d'une unité de base par 200 m² de surface au sol. Toutefois, pour l'activité industrielle, il pourra être admis de doter chaque zone de base d'un extincteur de 6 L ou de 6kg par 150 m².

III.2.3.1.1.2. La protection complémentaire

Elle représente l'ajout de dotation complémentaire à la dotation de base au niveau de la zone à protéger, dans le cas de présence de certains risques spécifiques. Elle englobe les dangers localisés, le stockage intérieur de liquide ou de gaz inflammables, le stockage en hauteur et les zones destinées aux travaux de peinture.

Il est à noter que lorsqu'une même zone fait l'objet de plusieurs dotations complémentaires, il peut être admis de ne pas les cumuler, notamment si elles correspondent au même agent extincteur. Il convient dans ce cas de prendre la dotation complémentaire la plus importante. Cependant, quelle que soit la configuration, **un extincteur sera toujours disposé à moins de 5 m du danger** ; son emplacement doit être tel que l'incendie n'empêche pas son utilisation.

Il existe plusieurs situations où une protection complémentaire doit être appliquée. Au niveau d'ALGESCO, les situations pouvant donner lieu à un complément de dotation sont les dangers localisés et le stockage en hauteur.

- Danger localisé : ils font l'objet d'une attention particulière à cause du risque que représentent ces derniers. Par exemple : les deux fours sous vide, le groupe électrogène, etc.
- Stockage en hauteur : la protection générale des stockages de plus de 3m de hauteur doit être complétée, sauf si le stockage est protégé par une installation de RIA ou par,

au minimum, 1 extincteur sur roues de 50 kg à poudre par fraction de 1000 m² de zone de stockage en hauteur et à partir d'un minimum de 400 m² de zone de stockage en hauteur. On entend par zone de stockage en hauteur, la surface occupée par les rayonnages proprement dits plus la surface des allées.

Il est à noter que, dans le cas d'une protection complémentaire, des extincteurs de capacité inférieure à celle des unités de base ou contenant un agent extincteur différent de celui des unités de base, peuvent être utilisés.

Dans cette étude, une protection complémentaire sera mise dans les zones : 1, 2 et 10. Ces zones correspondent à :

- des dangers localisés, pour les zones 2 (partie statorique) et 10 (groupe électrogène).
- un stockage en hauteur pour la zone 1(magasin).

III.2.3.1.1.3. La protection d'activités particulières

Les activités particulières nécessitant une dotation différente de la dotation de base sont : le stockage extérieur de liquides ou de gaz inflammables, les stations de distribution de carburant, le stockage extérieur divers, les chambres froides et entrepôt frigorifique.

A ALGESCO, il existe 2 types d'activités particulières :

- a. Le stockage extérieur de liquides ou de gaz inflammables

Ces stockages doivent être dotés par fraction de surface au sol de 200 m² au minimum comme indiqué dans le tableau 3.3. La zone concernée par ces dotations est la zone 8.

Tableau 3.3. Dotations correspondantes à des quantités de liquide ou de gaz inflammables stockées en extérieur

Quantité de liquide (L) ou de gaz (kg) inflammable	Dotation
Quantité ≤ 500	Pas de dotation.
501 ≤ Quantité ≤ 2500	1 extincteur de 9 kg poudre.
2501 ≤ Quantité ≤ 5000	2 extincteurs de 9 kg poudre.
Quantité > 5000	2 extincteurs de 9 kg et 1 extincteur sur roues de 50 kg poudre.

b. Le stockage extérieur divers (carton, plastiques, déchets, bennes à ordure, etc.)

Les zones de stockage extérieur permanentes situées à moins de 10 m du shop doivent être dotées au minimum soit d'un extincteur de 9 L ou 9 kg par fraction de surface au sol de 200 m² soit d'un extincteur sur roue de 50 kg à poudre par fraction de surface au sol de 1000 m². La zone concernée par cette dotation particulière est la zone 9.

III.2.3.1.1.4. Emplacement des extincteurs

Sauf raisons particulières, les extincteurs sont répartis de manière uniforme à l'intérieur de chaque zone de base. Ils doivent également être d'une part accessibles et d'autre part visibles ou signalés et leur support doit être solidement fixé à moins de 1,50 m du sol.

La disposition préconisée, en accord avec la règle APSAD R4, des extincteurs mobiles au niveau de chaque zone est donnée dans le tableau 3.4 et les figures 3.2 à 3.12.

Tableau 3.4 Répartition des extincteurs sur les différentes zones du site d'ALGESCO

Type de dotation	Zone	Superficie	Extincteurs		
			Nombre	Type	Capacité
Dotation de base	1	1 374.2	7	Poudre	9 kg
	2	2 181.1	11	Chariot CO ₂	10 kg
	3	72	1	Poudre	6 kg
	4	256	2	Poudre	9 kg
					6 kg
	5	2 442	10	CO ₂	14 kg
			2	Eau	9 L
	6	261	5	CO ₂	2 kg
	7	753.6	5	CO ₂	2 kg
			2	Poudre	6 kg
	8	456	2	Poudre	9 kg
	9	690	2	CO ₂	14 kg
			1	Eau	9 L
	10	-	1	CO ₂	14 kg
11	1 045	1	Chariot Poudre	50 kg	
		1	Eau	9 L	

Dotation particulière	8	456	2	Poudre	9 kg
	9	690	1	Chariot CO ₂	50 kg
Dotation complémentaire	1	1 374.2	1	Chariot CO ₂	50 kg
	2	2 181.1	2	Poudre	9 kg
	10	-	1	CO ₂	14 kg

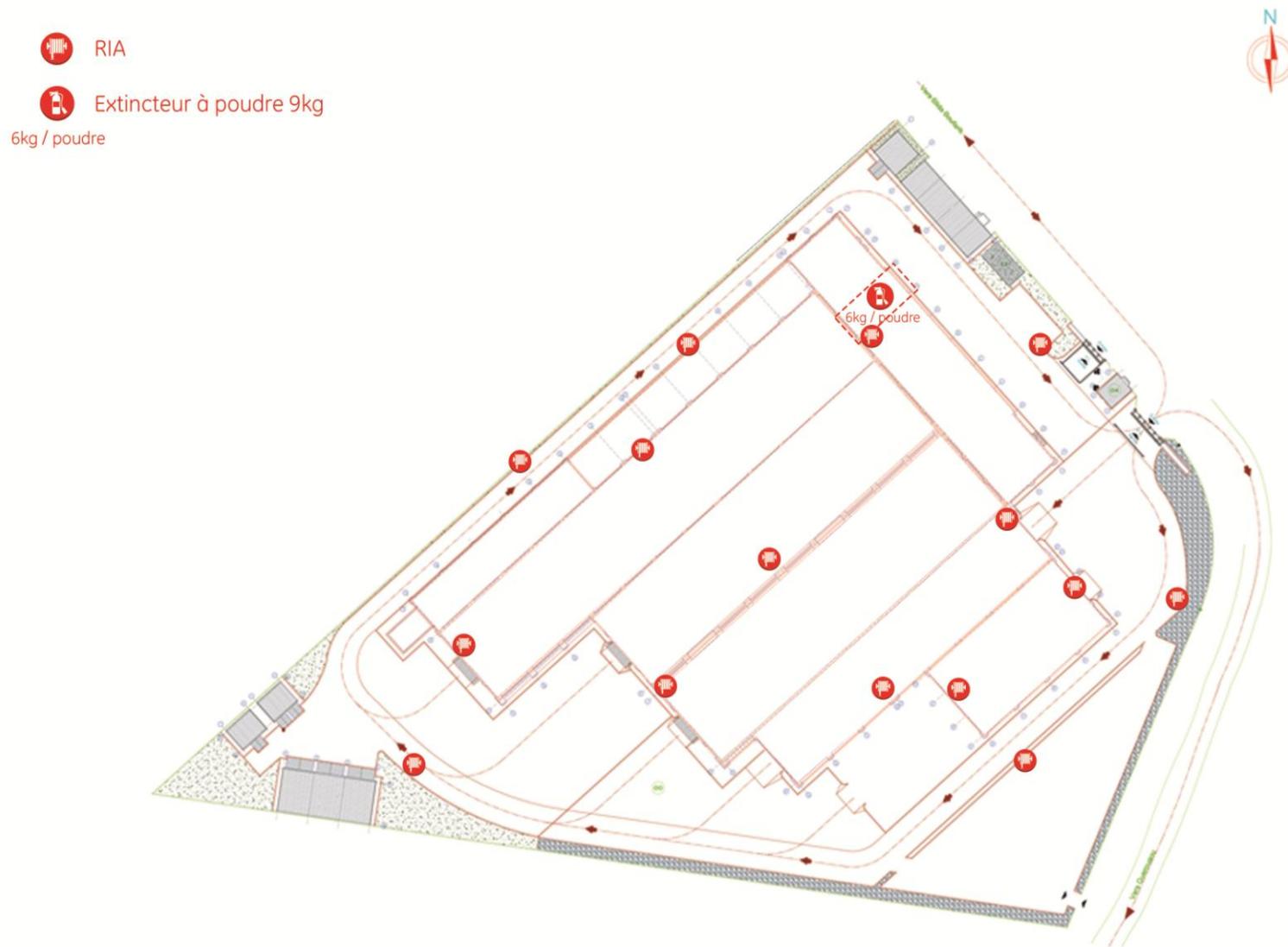


Figure 3.4 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 3 : Laboratoire de métallurgie

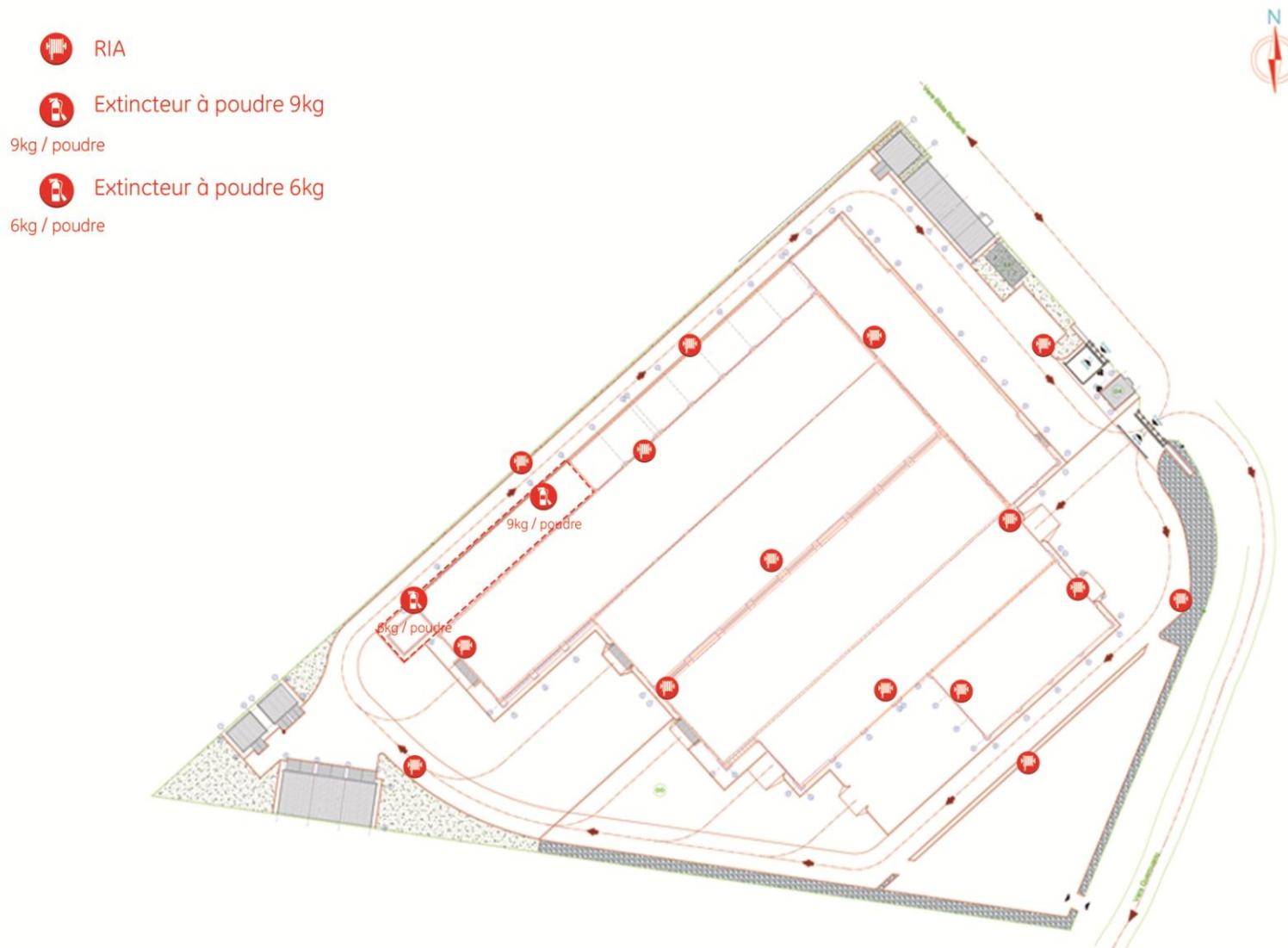


Figure 3.5 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 4 : Station de décapage chimique

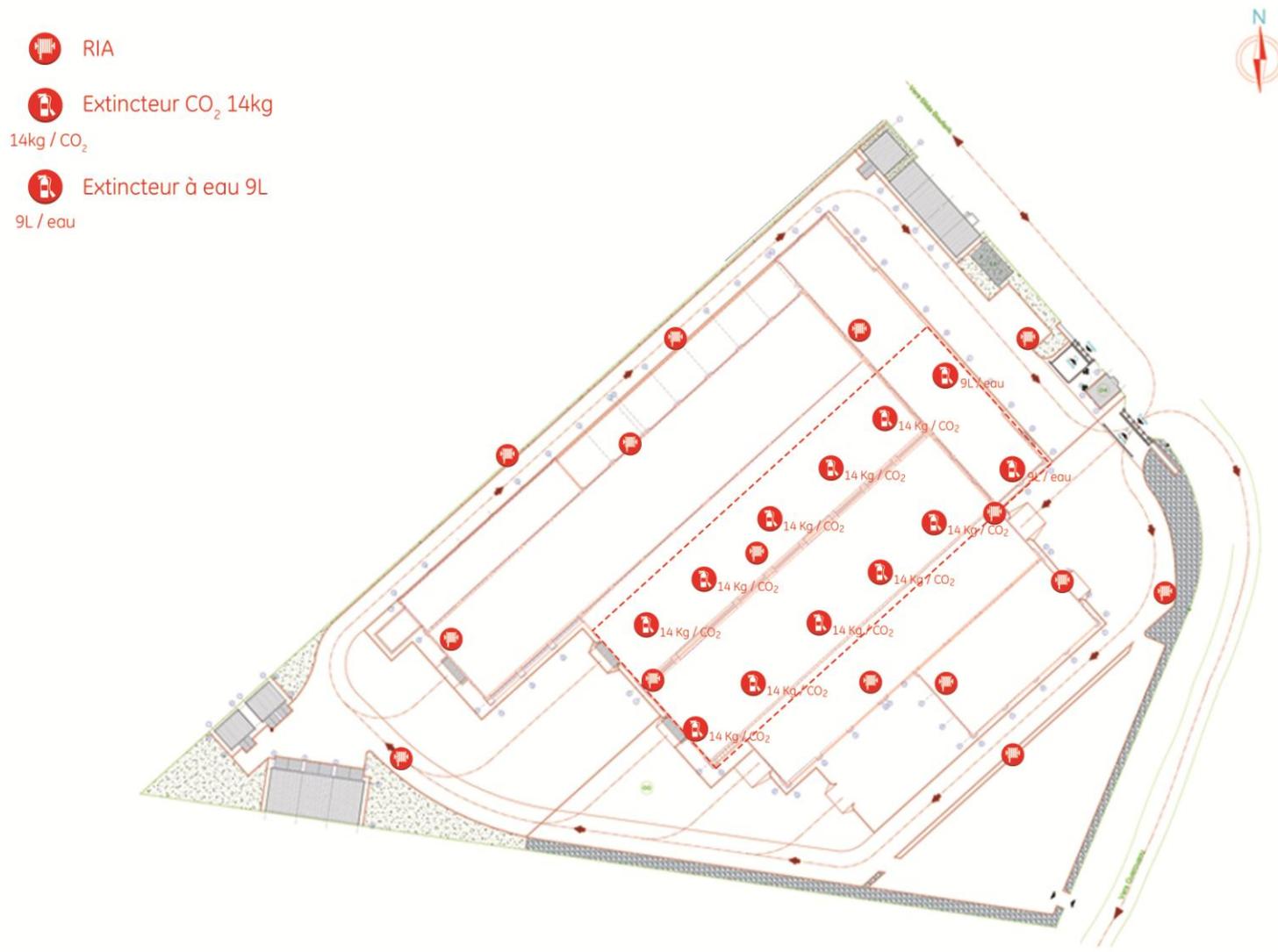


Figure 3.6 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 5 : Partie rotorique du shop

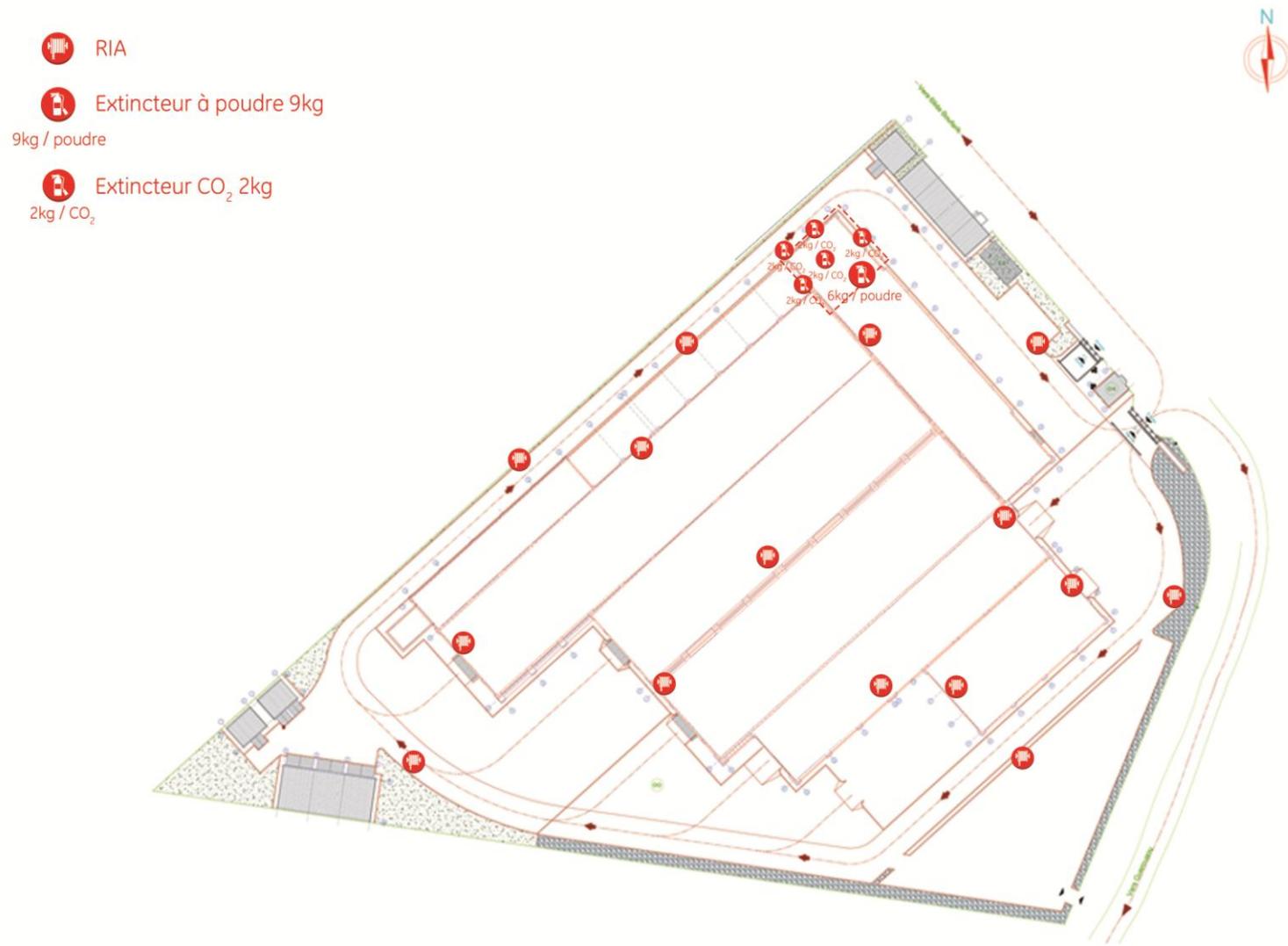


Figure 3.7 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 6 : Bureaux du rez-de-chaussée

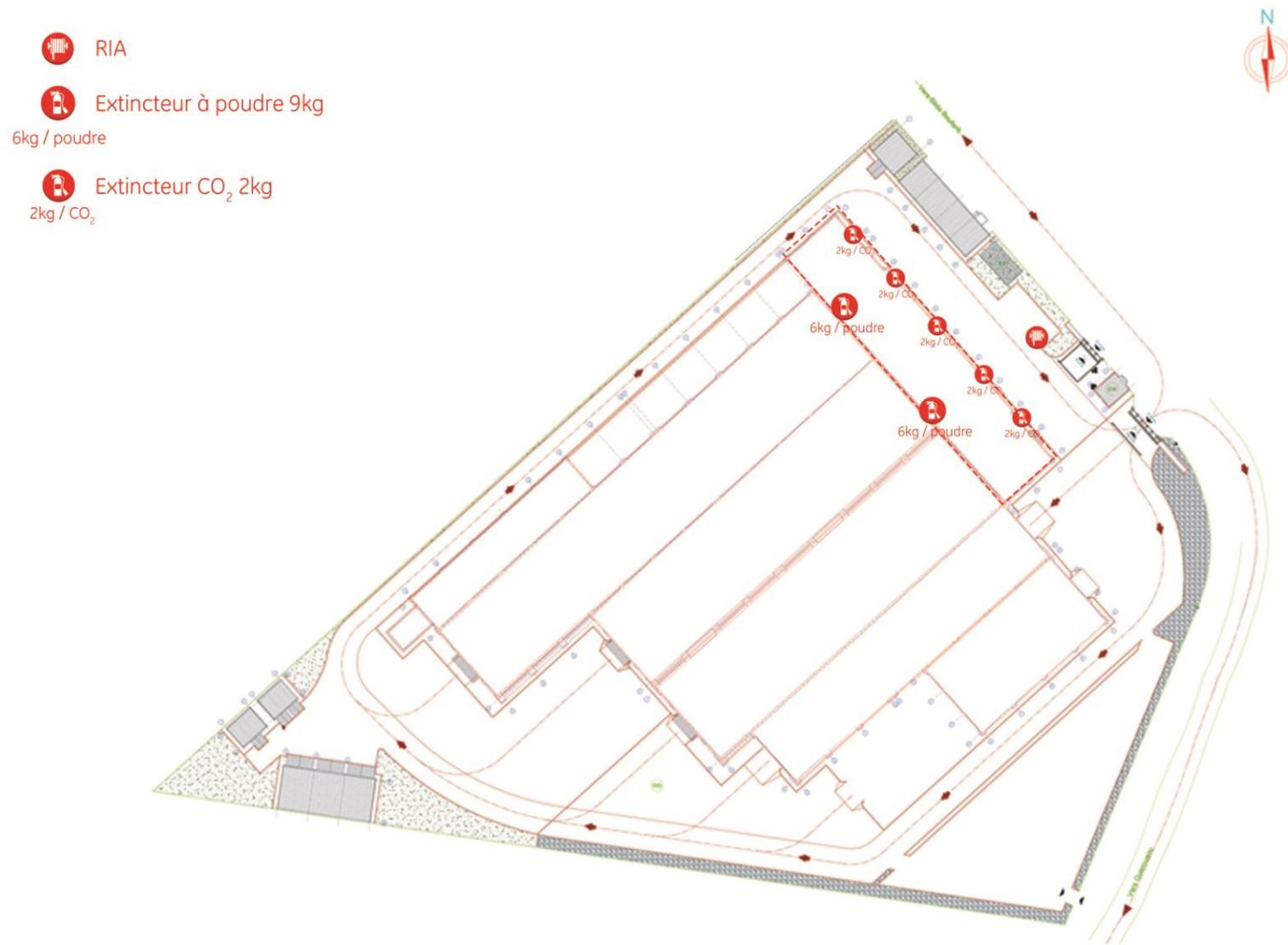


Figure 3.8 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 7 : Bureaux à l'étage

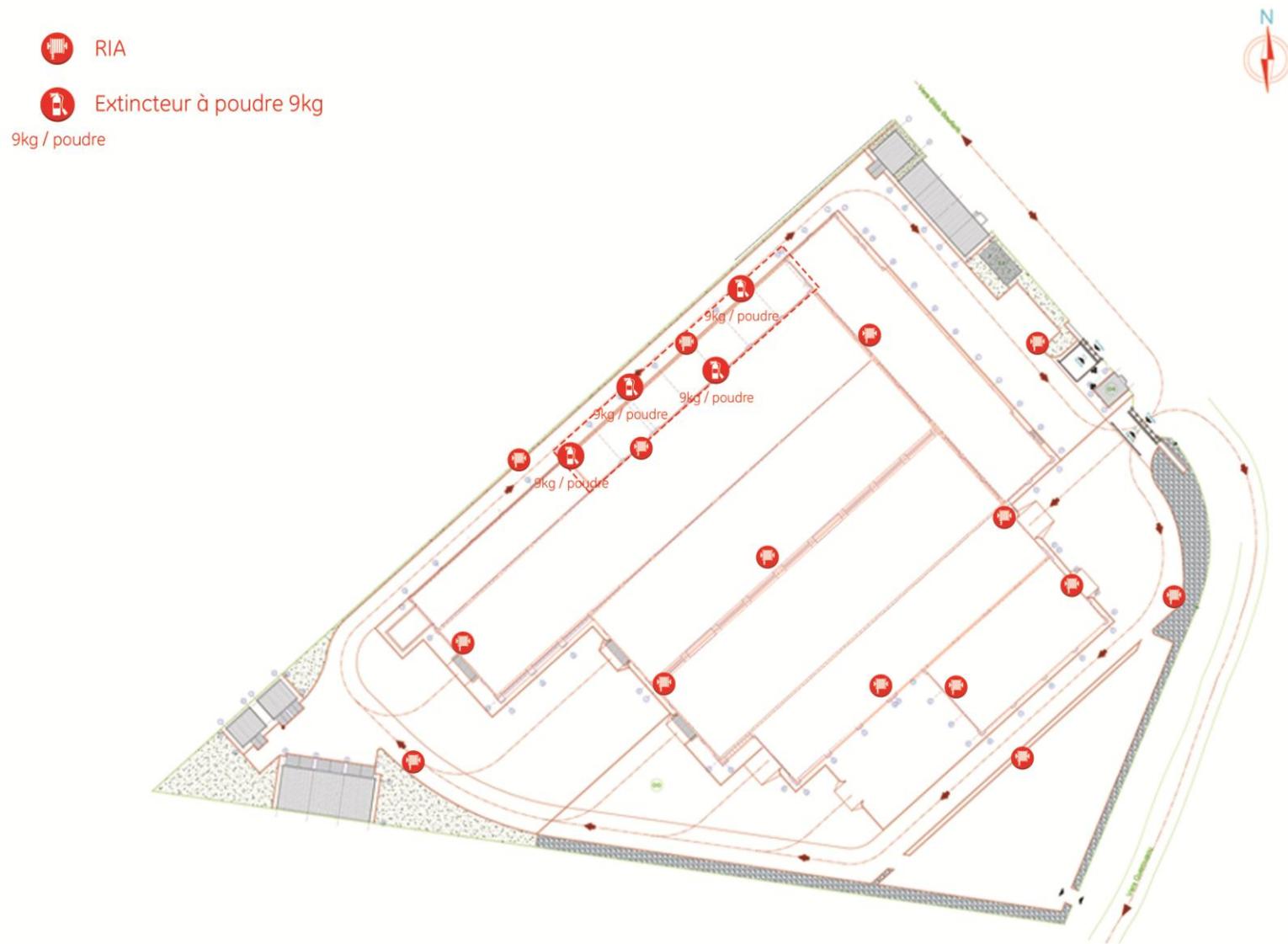


Figure 3.9 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 8 : Stockage du kérosène et des gaz

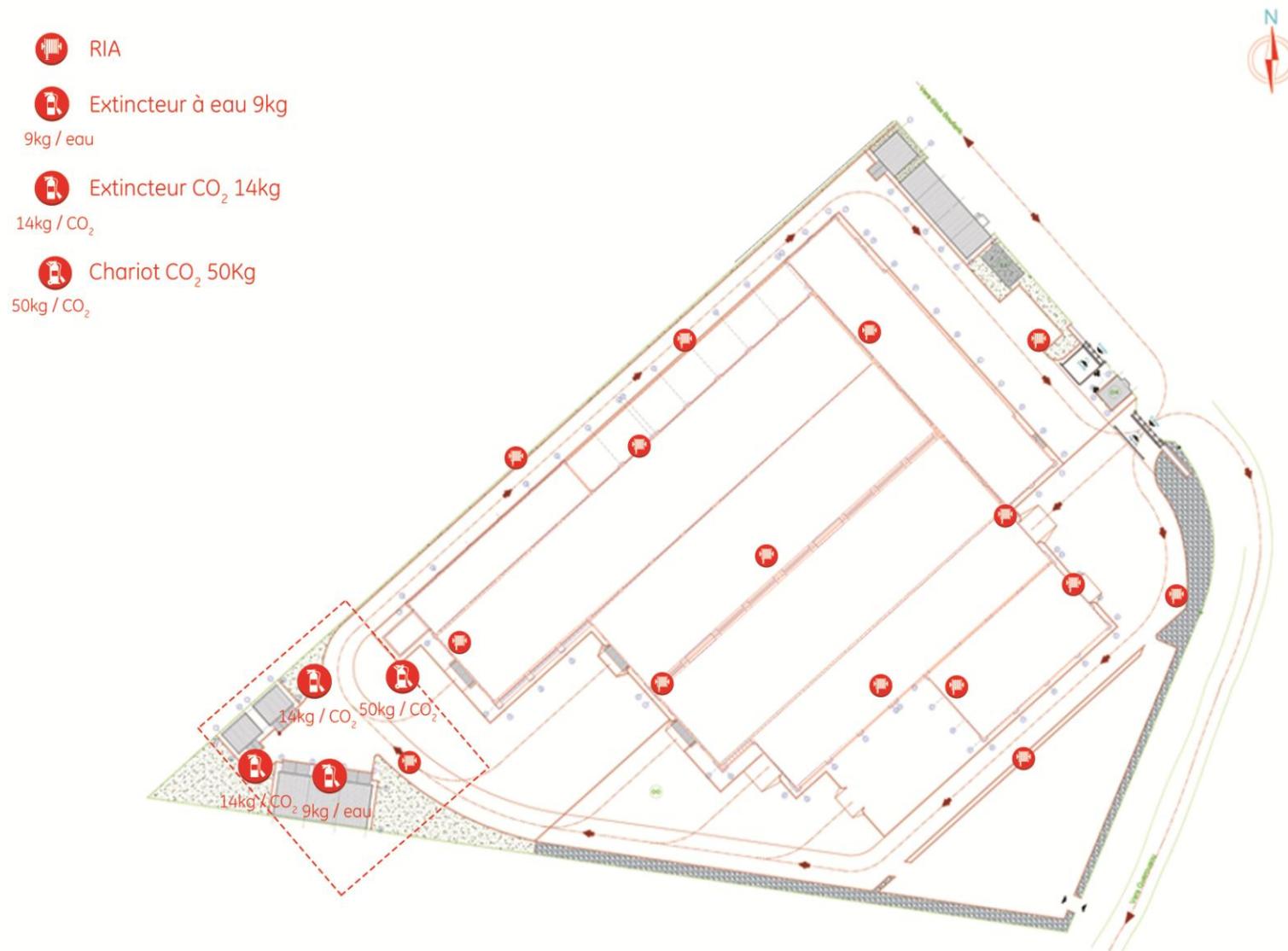


Figure 3.10 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 9 : Stockage des déchets

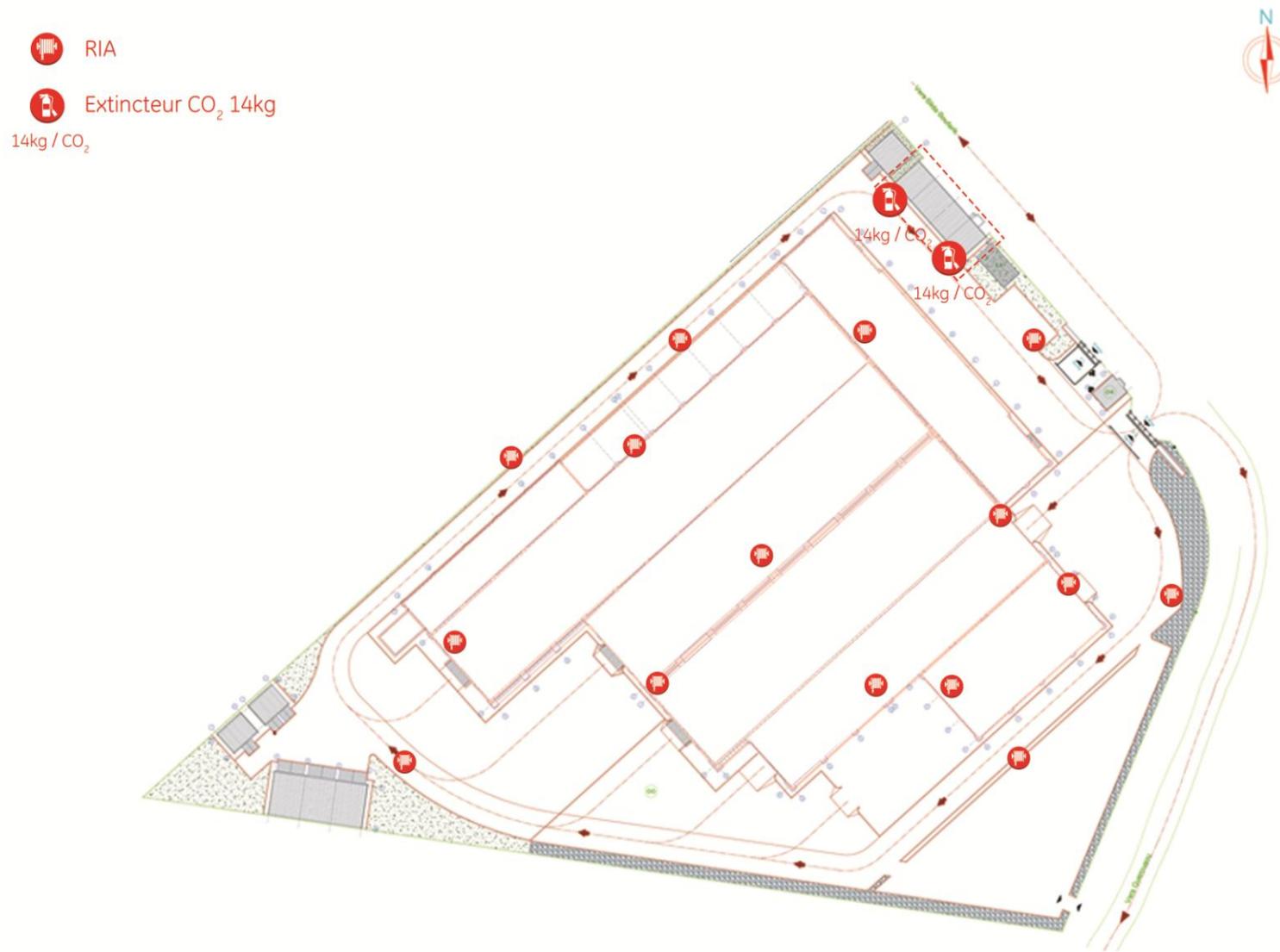


Figure 3.11 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 10 : Groupe électrogène

-  RIA
-  Extincteur à eau 9L
9L / eau
-  chariot CO₂ 50kg
50kg / CO₂

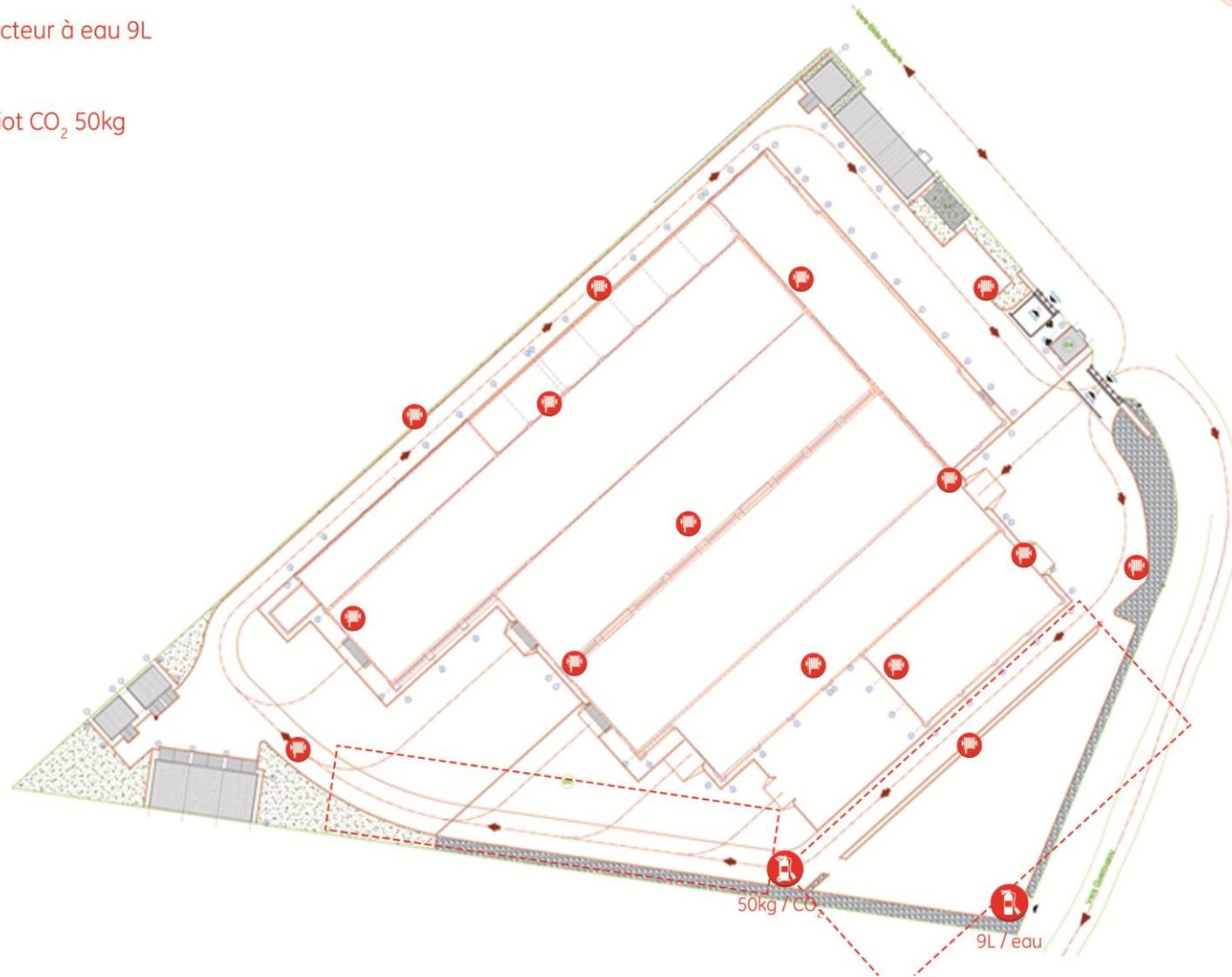


Figure 3.12 Répartition des moyens d'extinction au niveau de la zone 11 : Parking

III.2.3.1.2. L'alarme

L'alarme ayant pour but de :

- Prévenir les occupants pour leur permettre de prendre certaines dispositions (arrêt des machines, sauvegarde des données essentielles, etc.) et de procéder à l'évacuation. Ça sera à l'entreprise d'identifier les actions de sauvegarde à mettre en œuvre par son personnel et le délai de réalisation des ces actions devra être compatible avec les exigences d'évacuation rapide des personnes.
- Déclencher dans le minimum de temps l'intervention interne (si nécessaire).

Il est à noter que la durée maximale entre l'alarme et l'intervention doit être au maximum de 15 minutes. Cette durée se décompose de la façon suivante :

- 5 minutes pour la durée entre l'alarme et l'équipement de l'équipe d'intervention (en intégrant la levée de doute, l'appel et l'équipement).
- 10 minutes pour la mise en sécurité et la mise en œuvre des moyens d'intervention.

A ALGESCO, contrairement à l'état actuel des choses, il serait préférable que 2 types d'alarmes soient mis en place au lieu d'un seul et cela, conformément à ce que dicte la règle APSAD R6. Ces deux alarmes seraient : l'alarme restreinte et l'alarme générale.

Le but de l'alarme restreinte est de prévenir le poste de garde, occupé en permanence et chargé d'appliquer des consignes, notamment : la levée de doute, le déclenchement de l'alarme générale, de l'alerte et de l'intervention. Contrairement à l'alarme générale qui a pour but de diffuser le signal sonore d'évacuation des personnes.

Afin de mettre en place ces deux types d'alarme, il faudra que l'entreprise se munisse, en plus des avertisseurs incendies manuels présents à chaque issue (alarme générale), de postes d'appels téléphoniques intérieurs, disposés dans chaque zone, où un numéro d'urgence sera enregistré, l'appel sera transmis directement au poste de garde (alarme restreinte).

III.2.3.2. Organisation du service d'intervention

Il est important d'avoir une intervention bien coordonnée et organisée. ALGESCO dispose d'agent formé à l'intervention mais d'aucune organisation ni stratégie d'intervention. Pour cela, en se basant sur les exigences de l'APSAD R6, il serait plus judicieux d'organiser les moyens humains de la façon suivante :

- Un chef d'équipe d'intervention incendie,
- Trois équipes d'intervention interne.

Les équipes d'intervention interne devront se répartir selon deux niveaux de qualification :

- La première intervention, c'est-à-dire l'intervention immédiate et de façon coordonnée dans la zone de travail, avec les moyens disponibles sur place (RIA, extincteurs portatifs et mobiles). Elle devra être réalisée par l'équipe de première intervention (EPI), constituée en majorité, du personnel présent à l'intérieur du shop.
- La seconde intervention, c'est-à-dire l'intervention renforcée et coordonnée, devra être réalisée par l'équipe de seconde intervention (ESI), constituée en majorité par les agents du service de gardiennage.

Par ailleurs, il est nécessaire de pouvoir disposer d'une équipe d'intervention technique (EIT). Celle-ci aura pour mission d'effectuer les coupures et/ou les mises en sécurité des énergies et fluides (gaz, électricité, chauffage, arrêt des machines, etc.).

Quant au chef d'équipe d'intervention, il encadrera les différentes équipes (EPI, ESI, EIT) en cas de sinistre et s'assurera de leur sécurité et coordination. C'est également lui qui se chargera de transmettre les informations pertinentes aux secours extérieurs, à leur arrivée sur le site.

III.2.3.2.1. Composition des équipes d'intervention

En ce qui concerne l'EPI, l'effectif sera défini afin de répondre au critère suivant : leur répartition géographique sera telle qu'il soit possible de réunir en tous points d'une zone un effectif minimal de deux personnes en moins d'une minute.

Pour ce qui est des personnes faisant partie de l'ESI, elles sont choisies en tenant compte de la nature des risques, des séquences de travail et de la configuration des locaux. L'effectif de base est de cinq personnes (deux binômes d'intervenants et un contrôleur).

Enfin, pour ce qui est de l'EIT, le nombre d'intervenants est défini par l'entreprise en fonction des besoins identifiés. Dans le cas d'ALGESCO ça sera selon la qualification des personnes pour manipuler l'installation en question (four sous vide, cabines de coating, sableuse, équilibreuses, groupe électrogène, etc.).

La réalisation des missions des différentes équipes s'effectue sous la responsabilité du chef d'équipe d'intervention.

Le tableau 3.5 illustre des cas d'interventions contre l'incendie et l'effectif nécessaire à celle-ci, selon la règle APSAD R6.

Tableau 3.5 Effectif des équipes d'intervention selon la procédure d'intervention

Actions séquentielles durant la lutte contre l'incendie	Justifications techniques	Effectifs (hors coordination par un chef d'équipe)		Profil de l'intervenant
		Minimum	Recommandé	
Lutte contre l'incendie avec des extincteurs portatifs	Le 2 ^{ème} équipier et les suivants peuvent effectuer des norias d'extincteurs et/ou lutter de manière coordonnée contre l'incendie.	1	≥ 2	EPI
Lutte contre l'incendie avec un extincteur mobile (sur roue)	2 équipiers sont nécessaires -Le 1 ^{er} déroule le flexible et attaque l'incendie -Le 2 ^{ème} met au préalable l'extincteur sous pression et le déplace.	-	2	EPI-ESI
Lutte contre l'incendie ou refroidissement avec RIA	2 équipiers par RIA recommandés en raison de la présence des coudes, d'obstacle au déroulement du tuyau, ou par ce que le RIA ne dispose pas d'un orienteur. Surveillance des dangers par le 2 ^{ème} équipier.	1	2	EPI-ESI

Reconnaissance, mise en sécurité d'installations, sauvetage ou extinction dans un milieu où l'air n'est pas respirable (fumée, toxicité, etc.)	2 équipes en binôme sous ARI + un 3 ^{ème} équipier assurant le rôle de contrôleur de sécurité et de prise en compte des secours extérieurs sur les lieux du sinistre. Prévoir un binôme de secours si le délai d'arrivée des sapeurs-pompiers est > 10min à compter de la présence des ESI sur place.	3	≥ 5	ESI
--	---	---	-----	-----

Pour l'entreprise ALGESCO, l'effectif préconisé pour chaque équipe est donné en fonction des différentes zones, pour l'EPI, et en respectant les exigences citées plus haut. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Effectifs des équipes d'intervention par zone

Equipes d'intervention	Zones	Effectif recommandé
EPI	Zone 1 : Magasin	2
	Zone 2 : Partie statorique du shop	3
	Zone 3 : Laboratoire de métallurgie	2
	Zone 4 : Décapage chimique	2
	Zone 5 : Partie rotorique du shop	3
	Zone 6 : Bureaux rez-de-chaussée	2
	Zone 7 : Bureaux 1 ^{er} étage	2
	Zone 8 : Stockage (gaz et kérosène)	2
	Zone 9 : Stockage des déchets	2
ESI	-	5
EIT	-	5

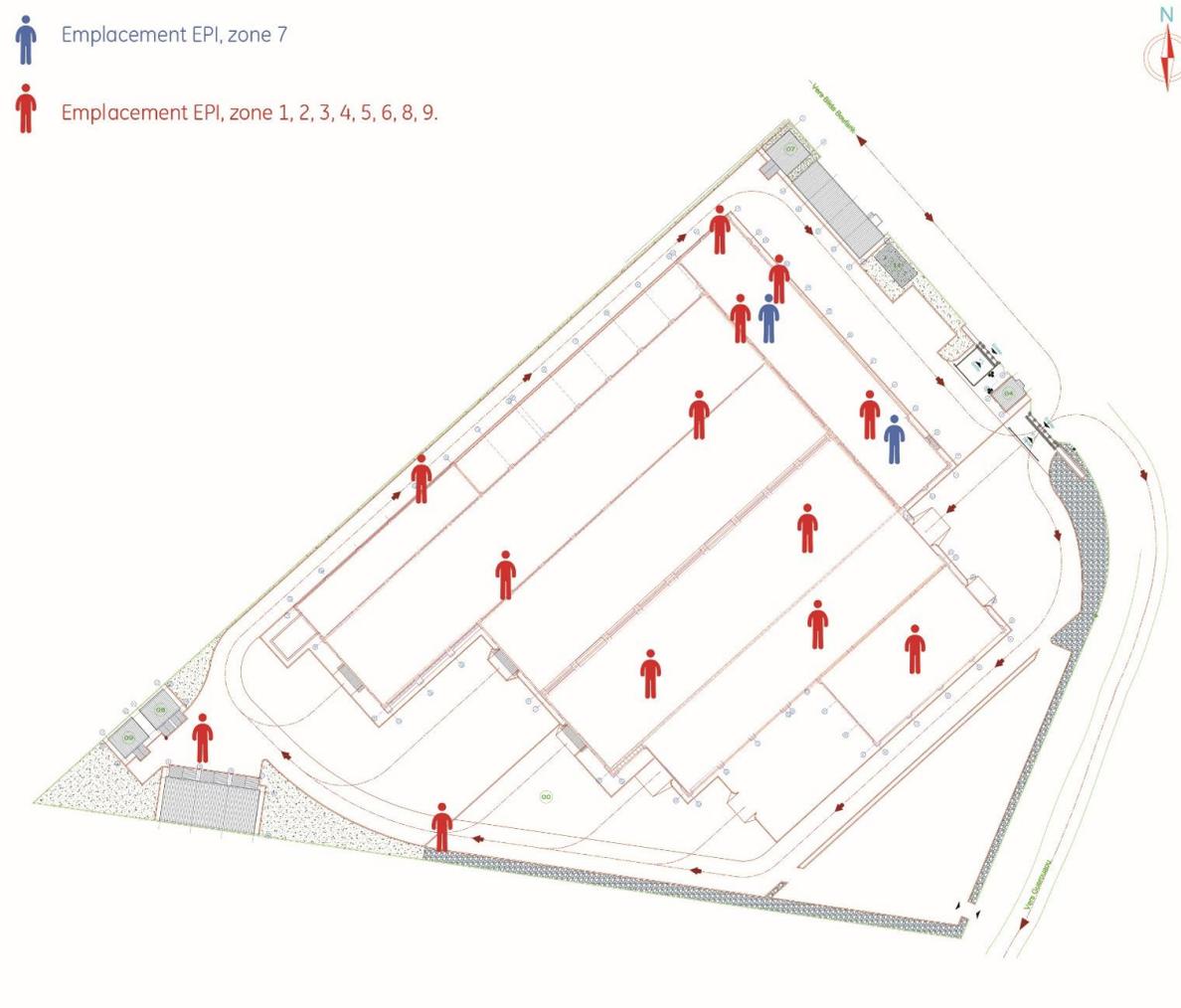


Figure 3.13 Emplacement des équipes de première intervention (EPI) dans le shop

Cet effectif de 30 personnes, en plus d'un chef d'équipe, devra être présent sur le site durant toutes les heures de travail.

ALGESCO étant un centre de maintenance qui reste ouvert jusqu'à 22h, les heures de travail se répartissent selon deux modes :

- Mode surface : de 8h à 16h,
- Mode de travail au poste : deux équipes se relayent, la première travaille de 6h à 14h et la seconde de 14h à 22h.

Il faudra donc choisir les membres de l'équipe d'intervention de telle sorte que l'effectif soit au complet à tout moment ; de 6h à 22h en effectuant des relèves et de 22h à 6h en assurant un service minimum avec l'équipe de gardiennage présente sur le site 24h/24 et déjà formé à l'intervention.

III.2.3.2.2. Formation et entraînement des équipes d'intervention

Il est primordial que les différentes équipes d'intervention suivent des formations, certaines en commun et d'autres spécifiques à chacune d'entre elles, pour garantir l'application rapide des consignes de sécurité incendie.

En dépit de cela, tout le personnel doit notamment avoir été informé des dangers que représente l'incendie et du rôle essentiel du « premier maillon » de la chaîne d'intervention pour lutter contre un départ de feu et sa propagation aux autres équipements et ainsi assurer l'évacuation des occupants.

Les consignes indiquant la conduite à tenir en cas d'incendie, devront être diffusées et affichées pour informer la totalité du personnel en veillant tout particulièrement à la clarté du texte et aux aspects linguistiques. Le document doit également être signé par le chef d'établissement.

a. Formation initiale de l'EPI

L'équipe devra recevoir une formation particulière, à la fois théorique et pratique, sur la prévention et la lutte contre l'incendie.

Une proposition de programme pour les deux parties de la formation est détaillée dans ce qui suit. [18]

Pour la partie théorique elle englobera :

- L'appréhension du phénomène de l'incendie et de sa propagation,
- La prise de conscience des risques et des effets de l'incendie sur l'Homme,
- La connaissance approfondie du site d'ALGESCO et ses process ainsi que les différents risques qui en découlent,
- La connaissance des mesures de prévention, en particulier celles concernant la sécurité des travaux par point chaud (opérations de soudage, de découpage de métaux, et toutes autres opérations génératrices de chaleur, d'étincelles...), tel qu'un permis de feu,
- La connaissance des consignes spéciales et particulières (alarme, intervention, évacuation, mise en sécurité des installations, préparation de l'intervention des secours extérieurs, etc.), des rôles de chaque acteur et des moyens de protection à disposition.

Quant à la partie pratique, elle se basera sur :

- La connaissance et le fonctionnement des moyens de lutte contre l'incendie dont dispose ALGESCO et prévus pour l'intervention de l'EPI,
- Des exercices d'extinction sur feux réels permettant de prendre en compte les difficultés d'intervention selon les classes de feu, avec les différents moyens à disposition de l'EPI,
- L'intervention coordonnée de plusieurs équipes lors d'exercices de simulation.

b. Formation initiale de l'ESI

En complément de la formation théorique suivie avec l'EPI, les équipes de seconde intervention recevront une formation pratique sur :

- La connaissance et l'utilisation de leurs équipements de protection individuelle,
- La connaissance du fonctionnement des moyens de protection et de lutte contre l'incendie dont dispose l'établissement et prévus pour l'intervention de l'ESI,
- Des exercices d'extinction en situations d'incendie réels permettant de reproduire les difficultés d'extinction selon les classes de feu et les difficultés de progression dues aux effets de l'incendie,
- L'intervention coordonnée de plusieurs équipes, en sécurité, en attendant les secours extérieurs.

c. Formation initiale de l'EIT

Les personnes désignées comme faisant partie de l'équipe d'intervention technique devront recevoir une formation théorique et pratique sur les consignes à suivre pour la mise en sécurité des installations, qu'elles doivent mettre en œuvre, sur ordre du chef d'équipe d'intervention.

d. Formation du chef d'équipe d'intervention

En complément des formations avec les EPI, ESI et EIT, le chef d'équipe d'intervention devra recevoir une formation théorique et pratique sur les domaines suivants :

- Une approche du commandement et de l'analyse tactique des situations d'urgence,
- La prise en compte de la sécurité des intervenants,
- La connaissance des consignes d'arrêt et de maintien en fonctionnement des moyens de protection mis en place en fonction des stratégies d'intervention de l'entreprise,
- La décision de la mise en œuvre du désenfumage et des règles de compartimentage en cas d'incendie,
- Les informations à transmettre aux secours extérieurs à leur arrivée sur site.

Les différentes équipes d'intervention devront également effectuer des séances d'entraînement pratique au moins une fois par ans, avec l'aide de la protection civile ; le but étant de développer leur expérience et de réduire leur appréhension vis-à-vis de l'intervention.

Ces exercices d'entraînement collectifs ont également pour objectifs de maintenir les réflexes opérationnels ainsi que la connaissance du site et des équipements de protection utilisés pour la lutte contre l'incendie, car ces derniers devront être portés afin de familiariser les équipes d'intervention et prendre en compte le temps d'habillage et de déplacement dans les stratégies d'intervention.

Il sera également important d'établir un compte rendu après chaque test afin d'améliorer les tactiques d'intervention.

III.3. Proposition d'un modèle d'évacuation

L'évacuation et la mise en sécurité du personnel est l'objectif prioritaire en matière de sécurité incendie. ALGESCO doit donc mettre en place une organisation permettant de garantir sa rapidité et efficacité : plan d'évacuation, point de rassemblement, recensement des personnes, etc.

Lors d'une évacuation, une tendance naturelle est d'emprunter un trajet habituel, même si ce n'est pas le trajet optimisé pour une sortie rapide, il est observé que certaines personnes instinctivement rebrousseront chemin vers la porte qui leur a servi à entrer, plutôt que d'emprunter une issue jusque là inconnue.

Le plan d'évacuation actuel d'ALGESCO envisage toutes les sorties du site y compris celles qui se trouvent dans la zone des process à haut risque comme circuit d'évacuation. Ce qui très dangereux étant donné que l'étude des effets dominos a montré que la propagation des évènements primaires peut mener à des accidents très graves en peu de temps. Il est donc primordial d'optimiser le plan d'évacuation, afin de garantir une mise en sécurité des personnes et une intervention rapide et efficace des EPI/ESI en cas d'accident majeurs avant l'arrivée des secours extérieurs. Les figures 3.14 et 3.15 représentent le plan d'évacuation que nous proposons.

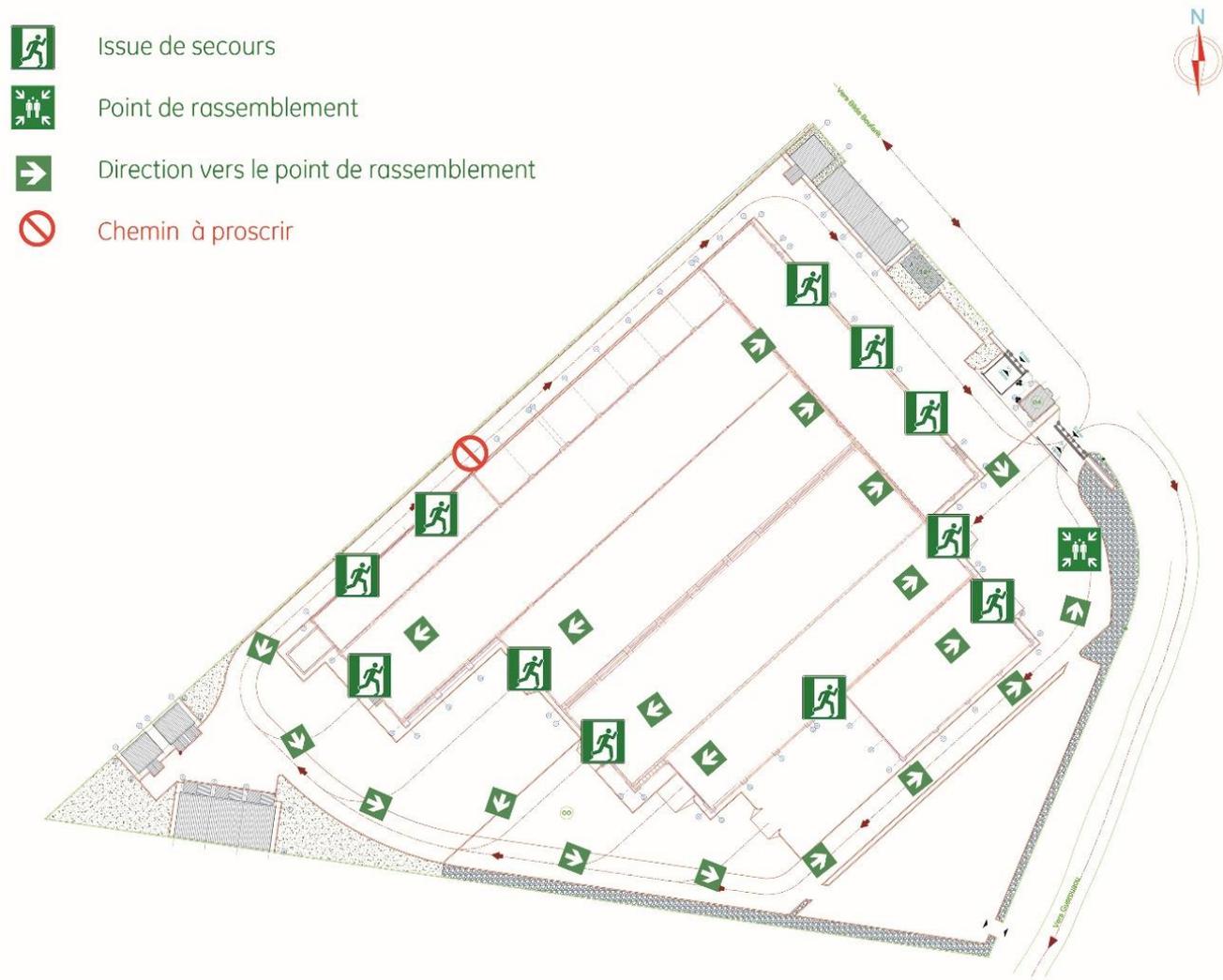


Figure 3.14 Plan d'évacuation proposé pour le rez-de-chaussée

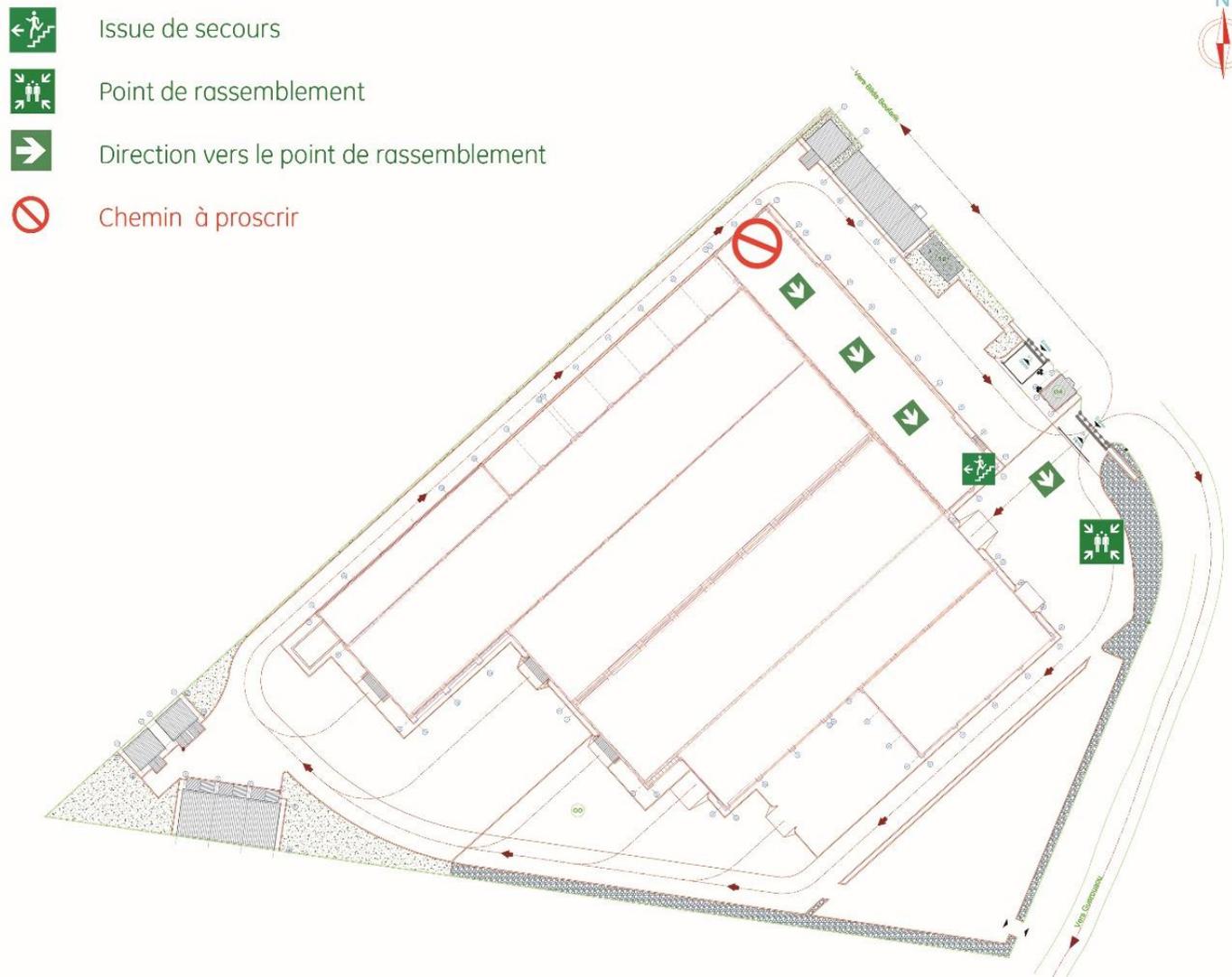


Figure 3.15 Plan d'évacuation proposé pour le niveau 1

En sachant que la caserne des pompiers est située à 13.5 km, dans le cas idéal, le temps estimé pour l'arrivée des pompiers est de 15 min. Nous devons donc déterminer le temps d'évacuation de l'ensemble du personnel afin de prouver la pertinence du plan proposé. A cette fin, le logiciel Pathfinder® sera utilisé.

III.3.1. Présentation du logiciel Pathfinder®

Pathfinder® est un logiciel de simulation, permettant une analyse fine des mouvements de piétons dans la planification urbaine, la gestion du trafic ou la simulation d'accidents et d'évacuations. C'est une solution à la fois pertinente et simple à mettre en œuvre pour analyser et améliorer les flux de piétons et les problématiques liées à la gestion des foules et dans notre cas, l'évacuation du personnel d'ALGESCO en cas de sinistre.

En effet, l'utilisation de Pathfinder® permet de détecter les congestions mettant en péril la sécurité, les zones de hautes densités des employés mais aussi d'évaluer les temps d'évacuation en cas d'incendie ou de situations d'urgence.

Pathfinder® est un logiciel de micro-simulation à base d'agents dans lequel chaque personne est modélisée individuellement, avec ses caractéristiques et son comportement propres.

Ce logiciel est devenu l'outil quotidien pour les ingénieurs sécurité dans leurs études de prévention incendie. Au-delà de l'aspect conception, la modélisation avec Pathfinder® d'installations existantes, permet aux gestionnaires de ces installations d'en optimiser les performances ainsi que la sécurité.

En plus de la visualisation 3D, Pathfinder® affiche des graphes d'occupation des pièces et de l'évolution des débits à chaque porte.

Le logiciel présente les avantages suivants : [19]

- Logiciel natif 3D permettant tous types de géométries,
- Interface ergonomique et intuitive,
- Import et intégration aisée des plans AutoCAD (dwg et dxf),
- Possibilité d'importer les géométries développées avec PyroSim®,
- Logiciel généraliste adaptable à divers domaines (transport en commun, urbanisme, plans d'évacuation, services publics, événements culturels ou sportifs, centres commerciaux),
- Visualisation 3D en temps réel des simulations,

- Outils d'analyse des flux, détection des congestions, densités d'usagers, goulots d'étranglement,
- Intégration des standard SPFE (Society of Fire Protection Engineers),
- Modélisation des escalators, plans inclinés, ascenseurs et escaliers,
- Récupération des informations de fumées, visibilité, température depuis FDS/PyroSim®,
- Capacités de calcul permettant l'intégration de plusieurs dizaines de milliers d'usagers au sein d'espaces vastes et complexes.

III.3.2. Résultats de la simulation Pathfinder®

Pour que la simulation se rapproche le plus possible de la réalité, le comportement des personnes dans les situations d'urgence a été étudié afin de définir les caractéristiques de déplacement les plus naturelles. Le comportement d'un occupant est généralement défini par une séquence d'actions tels que la vitesse de déplacement, le temps d'attente avant de sortir et le chemin parcourus.

Il est à noter que les simulations d'évacuation pour le rez-de-chaussée et le niveau 1 ont été réalisées séparément à cause de la taille de la maquette 3D et la nature du calcul qui nécessite des serveurs plus puissant que ceux dont nous disposant.

Pour l'estimation du nombre de personnes à évacuer, nous avons considéré le cas où il y a des formations et des visiteurs externes, ce qui est très fréquent à ALGESCO.

Ce qui nous donne un nombre de personnes à évacuer de :

- 100 personnes pour le rez-de-chaussée,
- 116 Personnes pour le niveau R+1.

La vitesse maximale de déplacement des occupants a été fixée à $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ pour éviter le déplacement anarchique, la propagation de la panique, les trébuchements, etc.

Les résultats obtenus de la simulation montrent que le temps nécessaire pour évacuer 104 personnes du niveau R+1 est de 120 s ce qui est très appréciable. Pour le rez-de-chaussée, l'évacuation des 116 personnes prendrait 140sec ce qui entre également dans le domaine de tolérabilité.

Cela signifie que l'élimination des escaliers qui se trouvent à proximité des process à haut risque ainsi que le passage par la zone de stockage ne va pas affecter le temps d'évacuation. Et donc le plan peut être retenu car l'évacuation a été optimisée en termes de sécurité.

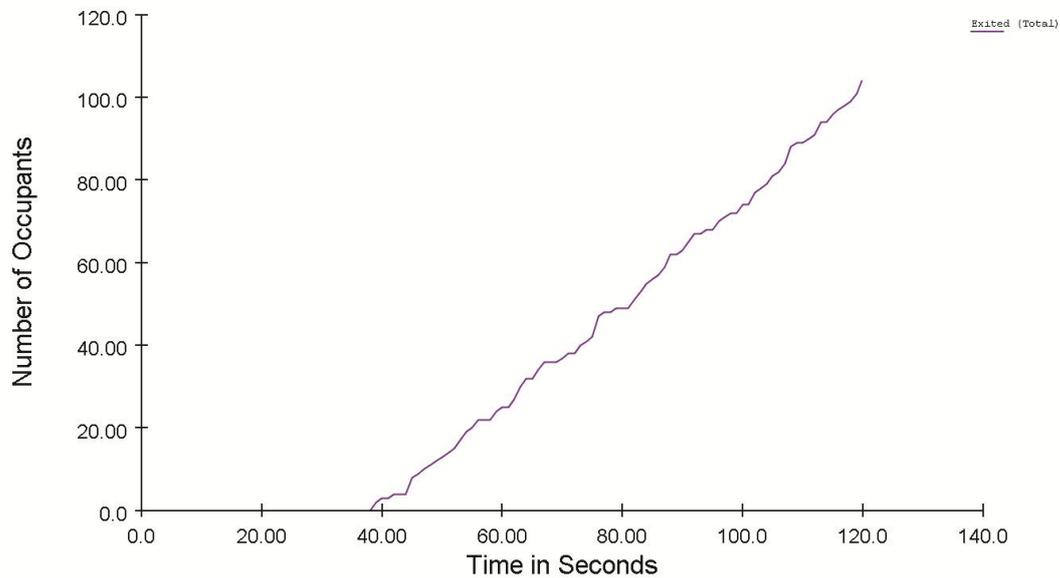


Figure 3.16 Graphe représentant le nombre de personnes évacuées du niveau R+1 en fonction du temps.

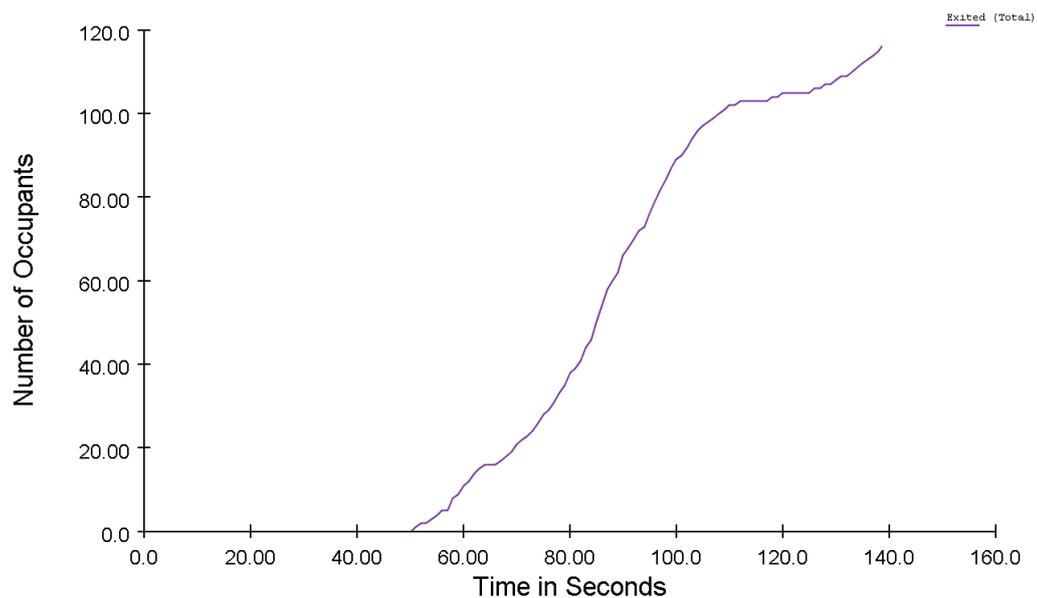


Figure 3.17 Graphe représentant le nombre de personnes évacuées du rez-de-chaussée en fonction du temps.

Le logiciel Pathfinder® nous permet d'obtenir des informations sur la vitesse de chaque personne et la densité d'occupation tout au long de l'évacuation (voir figures 3.18 à 3.21) ce qui va nous permettre d'avoir plus d'informations sur le déroulement de l'évacuation.

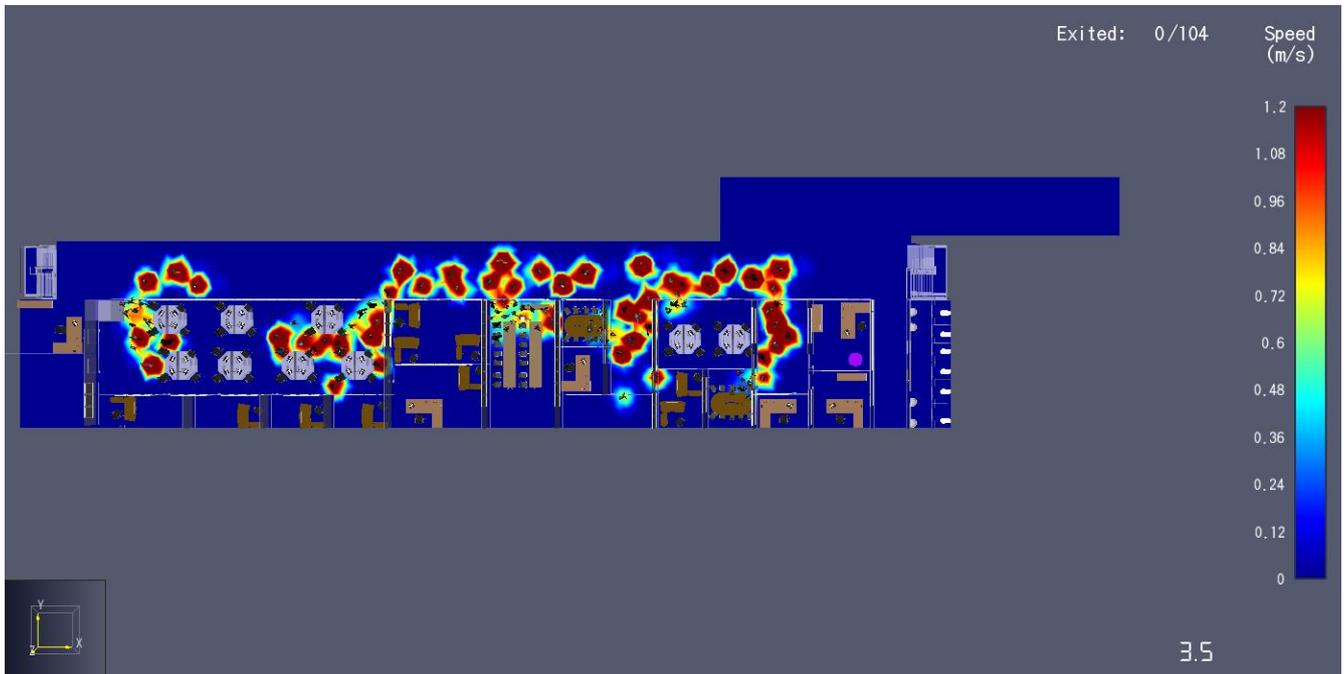


Figure 3.18 Vitesses des occupants à $t=3.5\text{sec}$ – vue de dessus (niveau R+1)

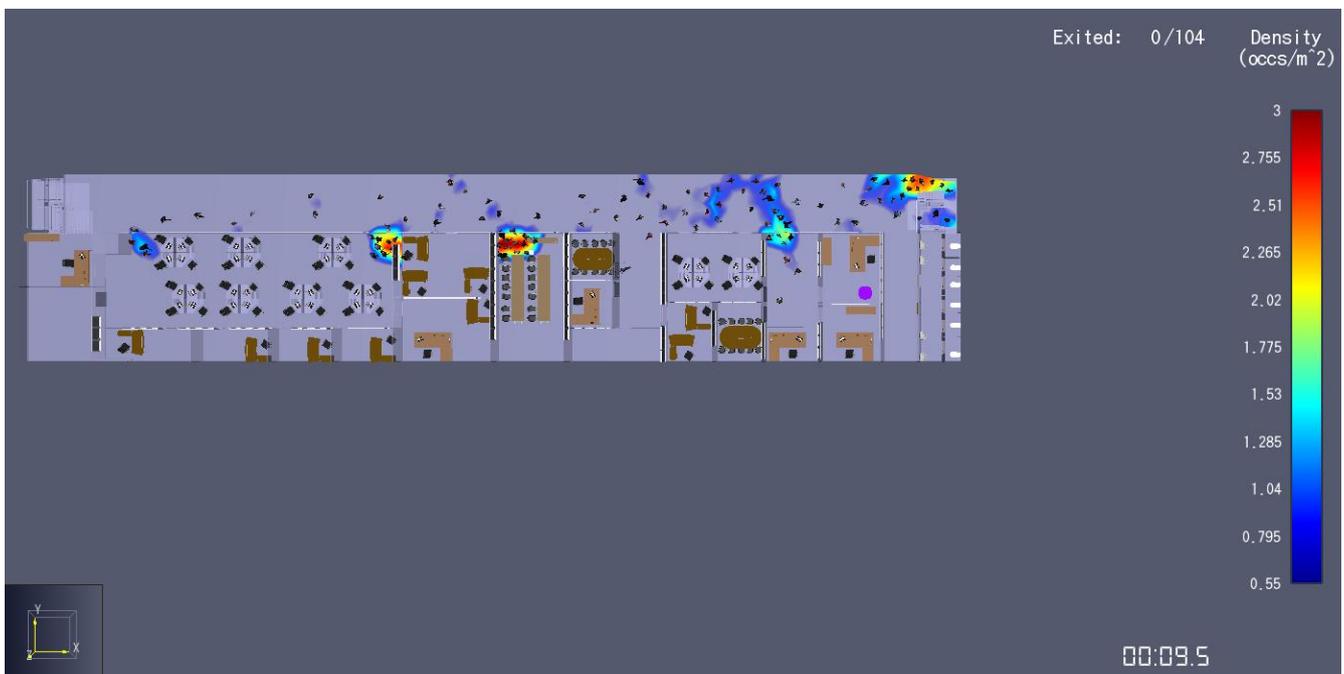


Figure 3.19 Densité d'occupation à $t=9.5\text{sec}$ – vue de dessus (niveau R+1)

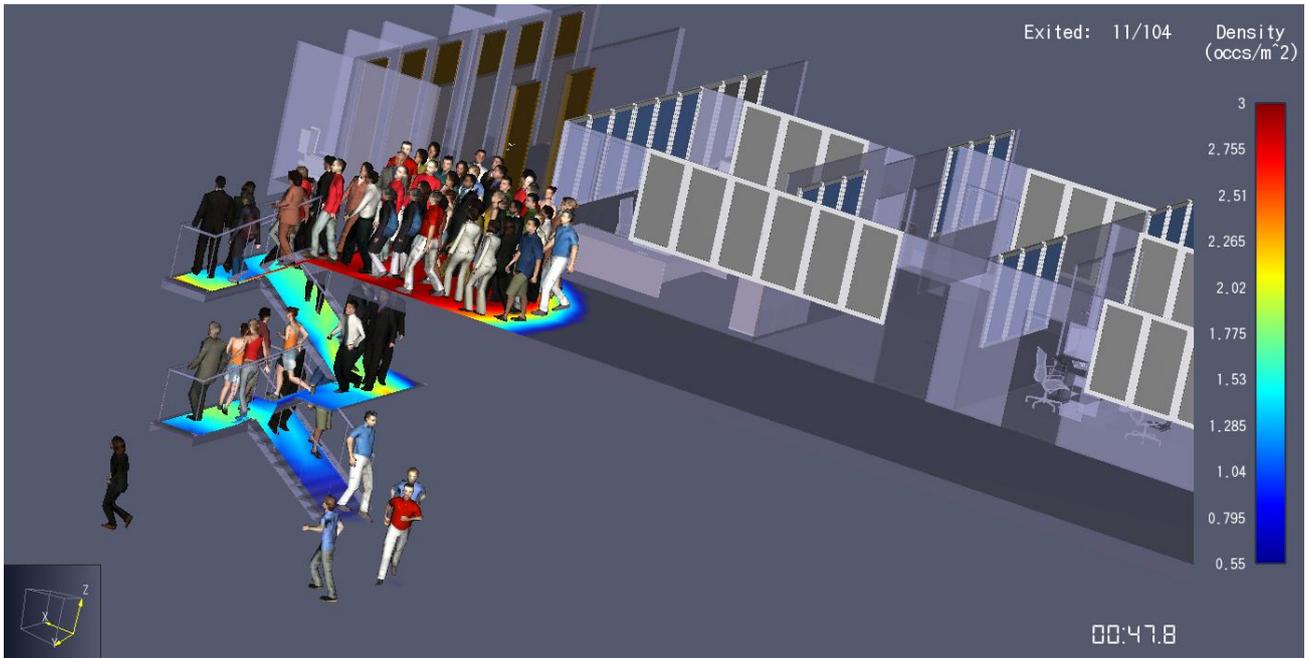


Figure 3.20 Densité d'occupants à t=47.8 sec – vue 3D

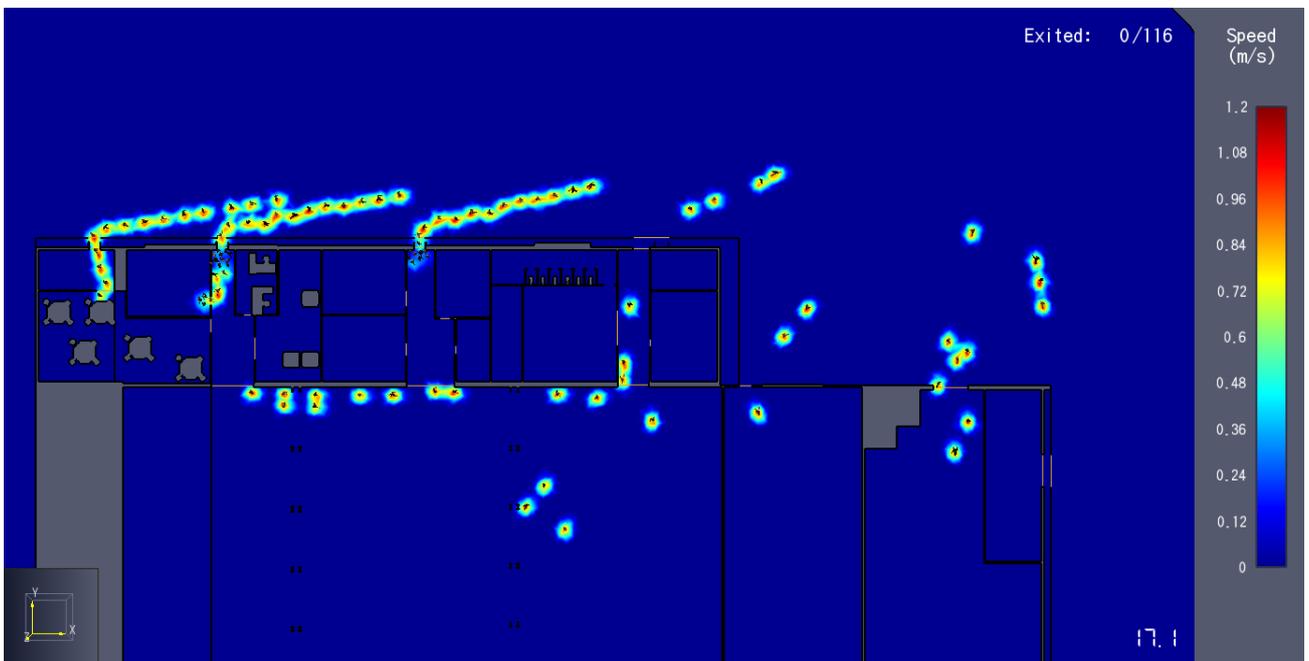


Figure 3.21 Vitesses des occupants à t=17.1sec – vue de dessus (rez-de-chaussée)

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les points qu'ALGESCO devrait améliorer afin d'être en mesure de faire face aux accidents à effets dominos. La disposition des extincteurs sur le site a été revue en appliquant la règle APSAD R4 pour garantir une intervention optimale du service d'intervention interne. Puis en s'appuyant sur la règle APSAD R6, un modèle d'organisation de ce dernier a été proposé ainsi qu'un modèle d'évacuation du personnel, afin de permettre la sauvegarde des équipements de l'entreprise et la mise en sécurité des personnes.

Nous passerons ensuite, dans le dernier chapitre de cette étude, à l'optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque, pour prévenir tout événement indésirable et intervenir dans les plus brefs délais. Et cela par le biais d'un tableau de bord digital connecté.

Chapitre IV

Optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque

IV. Optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque

Introduction

Dans ce chapitre, nous répondrons au dernier point de la problématique posée par l'entreprise et qui est : l'optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque. Et cela à travers l'implémentation d'un tableau de bord digital connecté. Nous débuterons par l'apport que présente ce dernier dans la surveillance de paramètres puis nous passerons à son architecture. A la fin de ce chapitre, nous proposerons également le développement d'une application mobile en complément du tableau de bord, qui facilitera d'avantage la communication entre les opérateurs et le service HSE.

IV.1. L'apport d'un tableau de bord digital connecté dans la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque

La mise en place d'un tableau de bord digital au sein d'une entreprise présente de grands avantages. Que ce soit sur le plan de la qualité, par le suivi régulier des indices de performances préétablis par l'entreprise. Ou en matière de sécurité à travers la surveillance de paramètres critiques.

Le fait que le tableau de bord digital soit connecté et affiché sur plusieurs interfaces, permettra le partage de l'information en temps réel à l'ensemble des personnes. Pour cela, il suffit que l'entreprise dispose d'une connexion réseau Internet, et de capteurs connectés.

En effet cela est possible grâce à la technologie de l'internet des objets (IdO), qui est une extension d'Internet à des choses et à des lieux du monde physique. Alors qu'Internet ne se prolonge habituellement pas au-delà du monde électronique, l'Internet des objets connectés représente les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs du monde réel avec le réseau Internet.

L'IdO par ces technologies de communication sans licence opérateur et sans infrastructure coûteuse permet des offres commerciales à faible cout. [24]

IV.1.1. Analyse du besoin de l'entreprise

Un manque de communication entre les différentes parties prenantes des process à haut risques a été relevé. L'alimentation en gaz des deux fours sous vide ainsi que les deux cabines

de revêtement thermique se fait à partir de la même source. Cette procédure comporte des risques liés principalement au fait qu'une utilisation simultanée de cette même source détériorait les pièces, causant ainsi un arrêt total du processus de coating et l'obligation de le reprendre depuis le début engendrant ainsi une perte de temps et d'argent (voir figure 4.1).

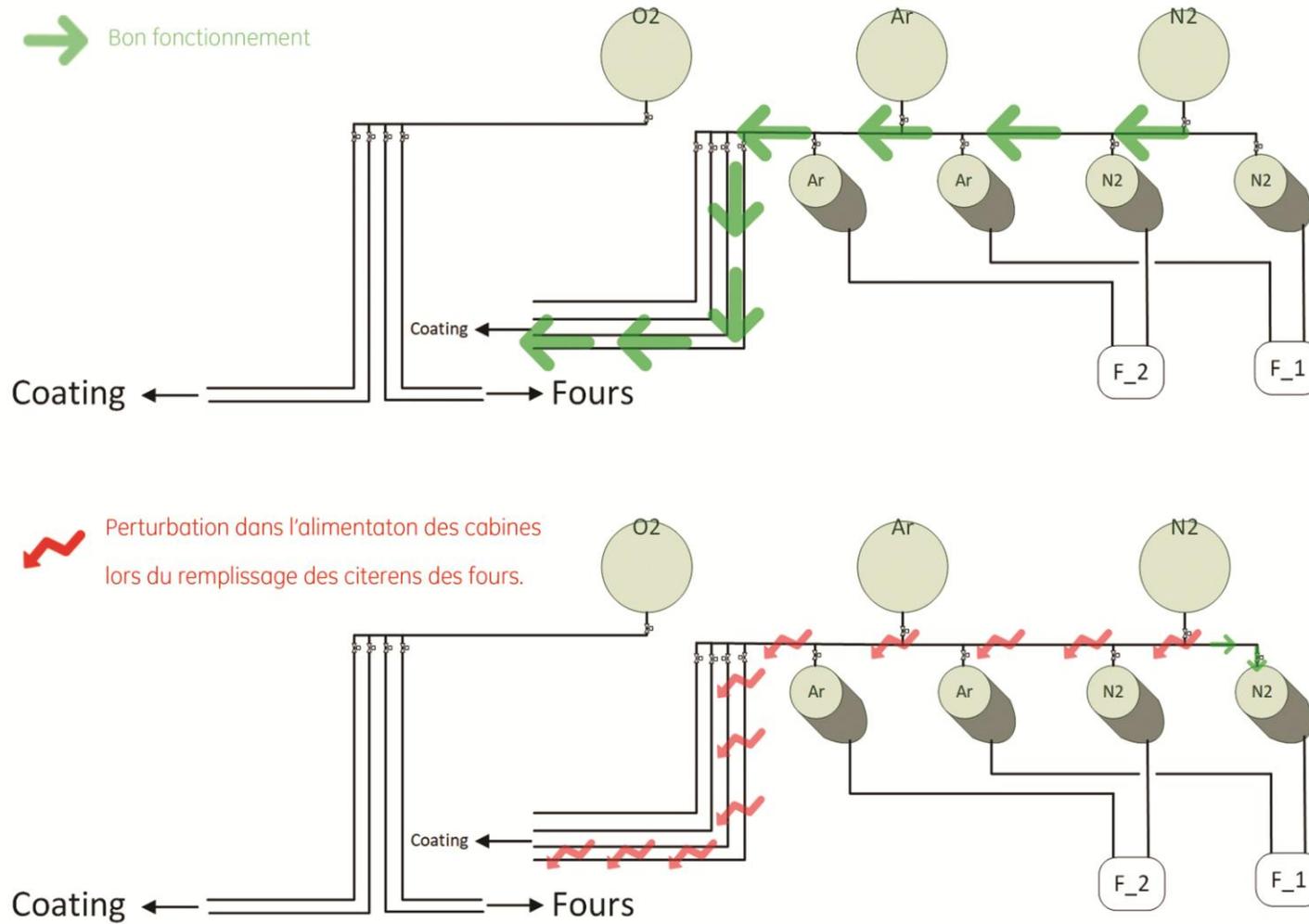


Figure 4.1 Schéma descriptif explicitant l'interconnexion entre les lignes des citernes de stockages qui alimentent les proces de revêtement et traitement thermique.

Les analyses de risques réalisées ont montré que les principaux événements redoutés centraux sont : [15] [16] [17]

- La suppression au niveau des réservoirs de stockage.
- La surchauffe des fours sous vide.
- Les fuites de kérosène.

Il est donc recommandé de mettre en place des outils permettant la surveillance et le suivi de la variation des paramètres à travers l'installation de capteurs connectés à un tableau de bord digital.

IV.1.2. Avantages de l'implémentation d'un tableau de bord digital connecté au sein d'ALGESCO

La mise en place du tableau de bord présente beaucoup d'avantage, parmi eux :

- La mise en place d'un mécanisme de communication et coordination entre les opérateurs.
- L'instauration d'une culture préventive.
- La collecte d'une base de données relative à la variation des paramètres tout au long du fonctionnement.
- Le tableau de bord s'inscrit dans la vision stratégique de l'entreprise visant à numériser l'information et assurer un reporting informatisé.
- La possibilité de faire évoluer les plans de maintenance et s'inscrire dans un cadre de maintenance préventive et non curative.
- Dans le long terme, le tableau de bord permettra de réévaluer les seuils de tolérance des équipements.
- Preuve de l'implication de l'entreprise dans le domaine de l'HSE ce qui poussera les employés à s'y intéresser.
- Environnement de travail sein (communication, accessibilité et partage de l'information).

IV.2. Mise en place du tableau de bord digital connecté

Les paramètres critiques que nous avons relevés sont :

- La pression des gaz (Argon, Azote et Oxygène).
- La température des fours sous vide.

La mise en place du tableau de bord nécessite un investissement en matière de :

a- Acquisition de capteurs connectés

L'analyse de fonctionnement des process a fait ressortir un besoin en matières de capteurs spécifiques à mettre place. Ces derniers sont quantifiés et répartis comme suit :

- 04 Capteurs de pression pour la mesure de la variation de cette dernière au niveau des canaux d'alimentation du four.
- 03 Capteurs de pression pour la mesure de la variation de cette dernière au niveau des citernes Linde Gaz (O₂, N₂ et Ar).
- 01 capteur de température pour chaque four sous vide.

Les capteurs de pression seront placés le long des canaux d'alimentation comme l'illustre la figure 4.2

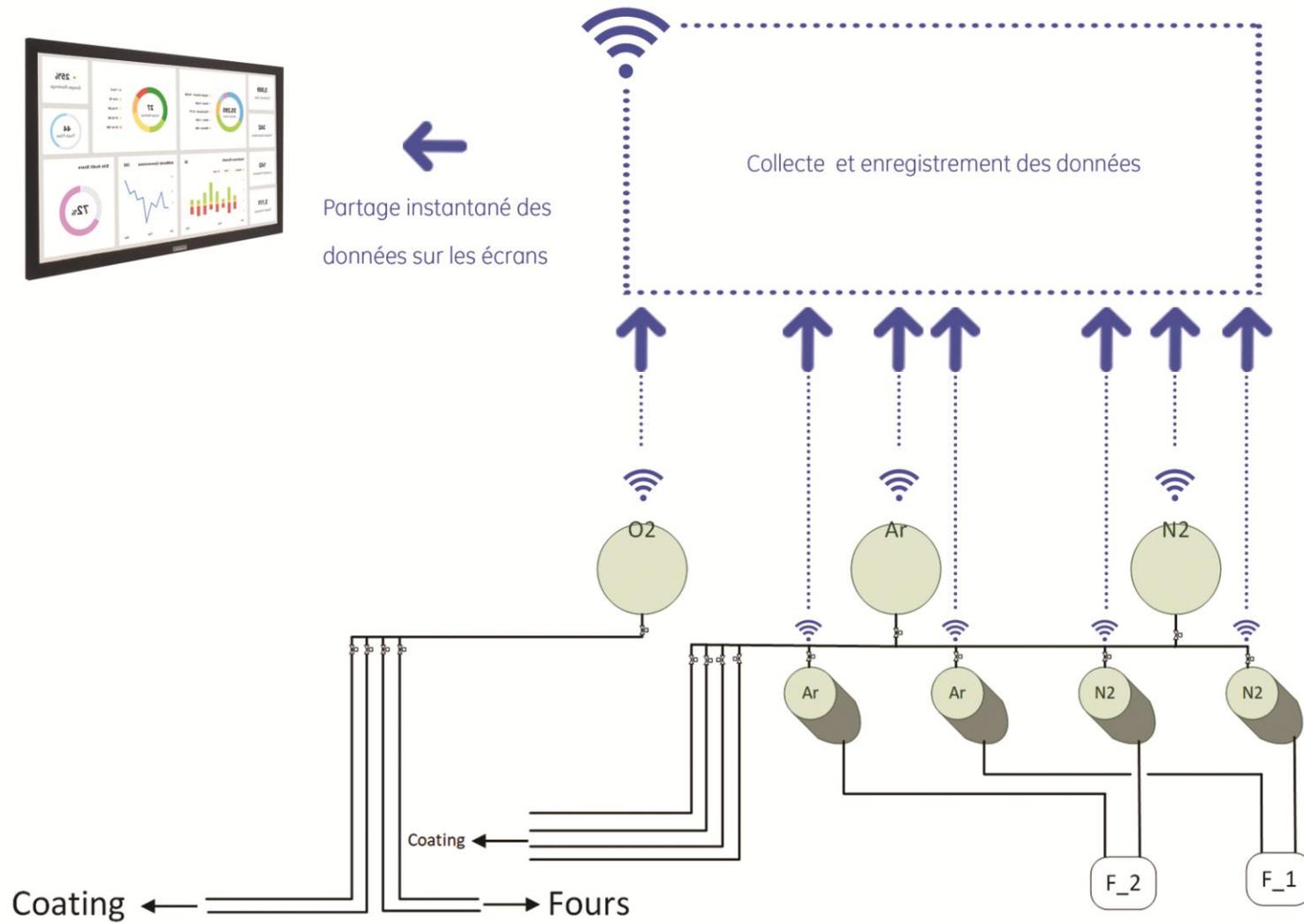


Figure 4.2 Principe de fonctionnement du tableau de bord et emplacement des capteurs de pression

b- Logiciel de traitement des données

Afin de pouvoir collecter, enregistrer et analyser les données relevées par les capteurs mis en place, il est indispensable de disposer d'un outil informatique (Logiciel de traitement de données). Ce dernier sera paramétré de sorte à collecter les données à partir des capteurs.

Lier un objet à Internet est un processus plus complexe que la liaison de deux pages Web. L'Internet des objets exige sept composants : [26]

1. Une étiquette physique (radio, graphique ou type SMS) ou virtuelle pour identifier les objets et les lieux. Dans le cas d'ALGESCO ça sera via une étiquette virtuelle.
2. Un moyen de localisation des étiquettes virtuelles.
3. Un dispositif mobile tel qu'un téléphone cellulaire, un assistant personnel ou un ordinateur portable.
4. Un logiciel additionnel pour le dispositif mobile.
5. Un réseau sans fil de type 4G ou Wi-Fi afin de permettre la communication entre le dispositif portable et le serveur contenant l'information liée à l'objet étiqueté. Pour ALGESCO, le réseau Wi-Fi serait plus approprié car il garantit une meilleure qualité de connexion internet et avec peu de panne.
6. L'information sur chaque objet lié. Cette information sera contenue dans une page Web prédéfinie.
7. Un affichage pour regarder l'information sur l'objet lié. Ça sera, en l'occurrence, les écrans d'ordinateur.

Le but étant d'affiché sur l'écran les informations récoltées par capteurs en temps réel et que des alertes soient affichées sur l'écran en cas de dépassement des seuils limites, prédéfinis pour chacun des paramètres.

L'investissement dans un tel projet sollicitant l'utilisation de technologies de pointe est considéré comme investissement à long terme voir très long terme. Les bénéfices engendrés par la mise en place d'un moyen de surveillance et suivi des paramètres critiques des process à haut risque ne peuvent pas être quantifiées en unité monétaire afin de les comparer avec les coûts.

IV.2.1. Architecture du tableau de bord

L'objectif principal de la mise en place d'un tableau de bord digital est le suivi instantané et la communication des paramètres jugés critiques avec tous le personnel d'ALGESCO. Le tableau de bord doit permettre à chacun de constater les variations ou les anomalies et de

réagir avant la survenue d'un évènement redouté. Il doit être également considéré comme moyen de partage d'informations, d'alertes et de motivation.

Les indicateurs à afficher sur l'interface doivent être simple et pertinent. Afin de choisir ces derniers et quels paramètres suivre, il est important de répondre aux questions :

- A quoi vont servir ces indicateurs ?
- Quels paramètres surveiller ?
- Jusqu'à quel niveau de détail aller ?
- Comment présenter et afficher les paramètres ?

Après avoir réalisé l'analyse du besoin et défini les paramètres à suivre, nous avons réalisé un modèle instinctif. La figure 4.3 montre une vue globale du tableau de bord.

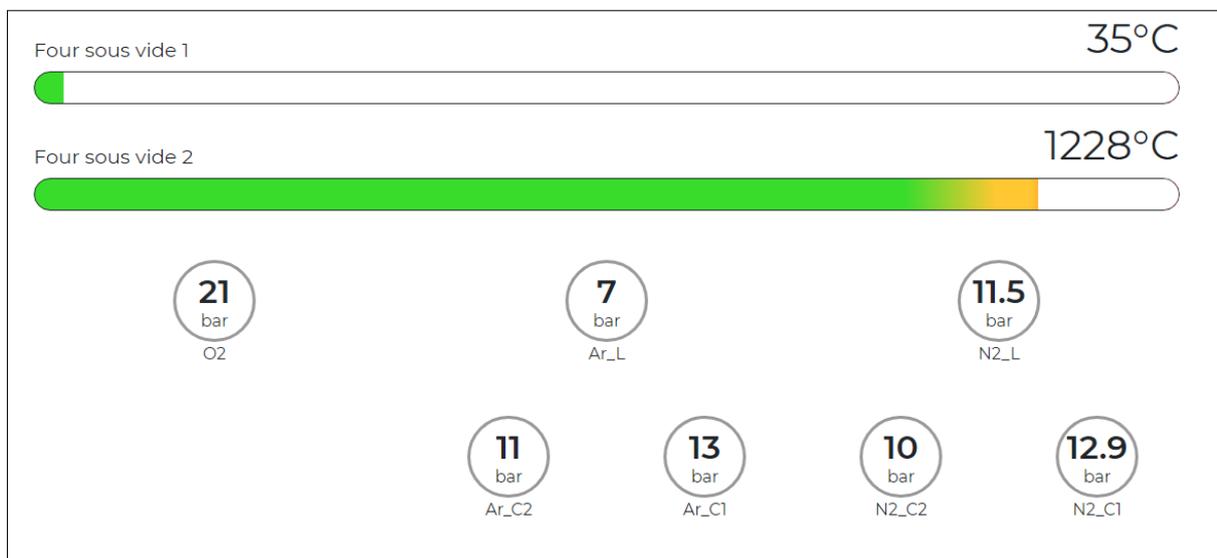


Figure 4.3 Exemple d'affichage pour le tableau de bord

IV.3. Prototype de l'application mobile

Le marché des Smartphones et des applications mobiles ne cesse de grandir. De nos jours, plusieurs applications facilitent la vie quotidienne et sont disponibles et utilisées par la majorité des personnes surtout celle appartenant au secteur industriel.

D'où l'idée de proposer un prototype d'application mobile pour compléter le tableau de bord.

Cette application aura comme objectifs :

- Faciliter encore plus la communication et le partage d'information.

- Alerter les utilisateurs en cas d'anomalie à travers les « notification push »
- Réduire la consommation de l'entreprise en papier et faciliter l'accès aux informations à travers l'intégration des MSDS, des fiches de sécurité et des manuels d'utilisation sous forme de PDF et remplacer la procédure de déclaration de problème ou préoccupation (*concerns*) par une messagerie dédiée à cela.

L'application aura pour nom « IC » dont le « I » signifie « Je » en anglais et le « C » pour « Care, Controle & Contribute » qui signifie « se préoccuper, contrôler, contribuer » et qui représente les 3 principes fondamentaux de l'application. La figure 4.4 représente le prototype de l'application.

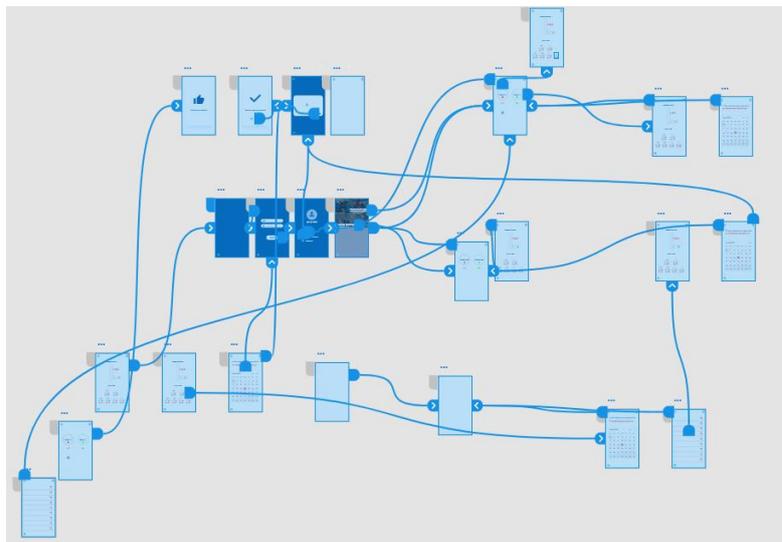


Figure 4.4 Prototype de l'application mobile « IC »

Conclusion

A travers ce chapitre nous avons pu proposer la mise en place d'un tableau de bord digital connecté afin d'optimiser la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque et également améliorer la communication entre les opérateurs des différents process. Cette mise en place nécessite l'installation de 7 capteurs de pression et 2 capteurs de température connectés.

Nous avons également élaboré l'architecture du tableau de bord et enfin proposé un prototype d'application mobile qui regroupera en plus des informations disponibles sur le tableau de bord, des fichiers tels que les MSDS des produits chimiques utilisés au niveau de chaque process, une messagerie pour envoyer les *concerns* aux responsables HSE, etc. Le but étant d'avoir accès à l'information de façon simple et améliorer d'avantage la communication entre les opérateurs et le service HSE.

Conclusion générale

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'étude des effets dominos et l'optimisation des moyens de surveillance des process à haut risque au niveau du centre de maintenance des turbomachines d'ALGESCO, situé à Boufarik. Pour ce faire, nous avons suivi une méthodologie se déployant sur deux axes.

Le premier axe de l'étude concerne les effets dominos engendrés par les process à haut risque. Nous avons identifié et évalué l'ensemble des scénarios dominos susceptibles de se produire au sein d'ALGESCO et cela en appliquant la méthode QRA pour les effets dominos, qui se décline en 10 étapes, débutant par la sélection des événements primaires et finissant par le calcul des indices de risques.

En se basant sur les études de risque déjà réalisées au sein de l'entreprise nous avons pu identifier les événements primaires susceptibles de donner lieu à des accidents dominos, et qui sont :

- VCE au niveau de la station de revêtement thermique (pour les deux cas : VCE dans la cabine N°1 et dans cabine N°2).
- Pool fire au niveau de la station de revêtement thermique.
- Incendie du four sous vide (pour les deux cas : incendie four sous vide N°1 et four sous vide N°2).
- Explosion du four sous vide (pour les deux cas : explosion four sous vide N°1 et four sous vide N°2).

En suivant les différentes étapes de la QRA, nous avons pu déterminer le nombre de niveaux dominos pour chaque événement primaire, tels que :

- VCE cabine N°1 : effet domino de 5^{ème} niveau.
- VCE cabine N°2 : effet domino de 1^{er} niveau.
- Pool fire dans la station de revêtement thermique : effet domino de 4^{ème} niveau.
- Incendie four sous vide N°1 : effet domino de 2^{ème} niveau.
- Incendie four sous vide N°2 : effet domino de 2^{ème} niveau.
- Explosion four sous vide N°1 : effet domino de 1^{er} niveau.
- Explosion four sous vide N°2 : effet domino de 1^{er} niveau.

Nous avons ensuite calculé les indices de risque individuel et sociétal pour l'événement primaire « VCE au niveau de la cabine de coating N°1 ». La notion d'indices de risque est souvent négligée, c'est pourquoi nous avons jugé important de l'aborder dans cette étude.

Le premier indice nous a permis de délimiter les zones où toute personne présente est touchée par l'effet. Ensuite, en calculant le deuxième indice, nous avons pu avoir une estimation du nombre de personnes exposées. Ces indices analysés et étudiés avec les autres critères d'acceptation de risque (le niveau de perte, les facteurs économiques, politiques et sociaux, la confiance dans l'estimation du risque, l'ampleur des dégâts, etc.) vont permettre d'évaluer concrètement le risque.

Le second axe de l'étude quant à lui traite de l'optimisation de la surveillance des paramètres critiques des process à haut risque et du service d'intervention d'ALGESCO.

Nous avons débuté par l'évaluation du service d'intervention d'ALGESCO afin de déterminer si l'entreprise est en mesure de faire face aux accidents à effet domino. En se référant aux règles APSAD R4 et R6, nous avons été en mesure de réorganiser la répartition des moyens de première intervention sur l'ensemble du site et de proposer une nouvelle structure organisationnelle du service d'intervention en intégrant 3 équipes (EPI, ESI et ETI) afin que l'intervention interne soit optimale. Pour finir, nous avons mis en place un nouveau plan d'évacuation afin d'éviter que le personnel emprunte les chemins qui traversent la zone où se situe les process à haut risque. Pour vérifier la pertinence de notre plan d'évacuation, nous avons utilisé le logiciel Pathfinder®. Les résultats obtenus par la simulation démontrent que notre plan permet d'évacuer le personnel du rez-de-chaussée en 140 sec et celui du niveau (R+1) en 120 sec ce qui est tout à fait recevable étant donné que les secours extérieur mettent en moyenne 15 min pour rejoindre le site de Boufarik.

Nous avons achevé cette étude par la présentation d'un prototype de tableau de bord digital. Qui par la mise en place de capteurs de pression et de température connectés, permettra de partager les informations recueillies par ces derniers sur une interface disponible pour tous les opérateurs et responsables afin d'améliorer la communication entre les process et optimiser la surveillance de ces derniers.

Nous tirons comme enseignement de ce travail, que le risque n'est pas une fonction simple de type produit de probabilité et de gravité des conséquences, mais une fonction multiparamétrique extrêmement complexe de tous les facteurs circonstanciels entourant la source de l'événement. Ceci fait de l'étude des effets dominos un domaine complexe dont les recherches sont encore d'actualité et l'évaluation quantitative des risques à effet domino n'est

pas possible à 100% du fait de la non disponibilité de modèles mathématiques pour l'évaluation de la propagation de certains effets telle que l'effet projection (missile) ainsi que la non disponibilité d'outil informatique permettant la simulation de la rupture de réservoir contenant des gaz inertes.

En guise de perspective, nous proposons la mise en service du prototype de tableau de bord digital connecté et l'application mobile « IC ». Le site d'ALGESCO reste relativement petit et contient que 2 process jugés à haut risque, il serait intéressant d'utiliser ce travail comme modèle en l'appliquant au niveau d'une raffinerie où le nombre de process est beaucoup plus important. Il serait également intéressant d'intégrer la méthode QRA pour les effets dominos au programme de la formation QHSE-GRI, car c'est une méthode complète qui touche l'ensemble des points de notre spécialité.

Bibliographie

- [1] Genserik Reniers, Valerio Cozzani, 2013, Domino Effects in the Process Industries-Modelling, Prevention and Managing, ELSEVIER.
- [2] Algesco, un partenariat exemplaire, L'Éconews, <http://www.leconews.com>, consulté le 15-03-2018 à 10h30.
- [3] <https://www.ge.com/ag/> consulté le 15-03-2018 à 13h15.
- [4] Baker Hughes et GE Oil & Gas fusionnent pour créer la première et unique entreprise Fullstream de l'industrie du Pétrole et du Gaz, ALGERIE ECO, <https://www.algerie-eco.com> consulté le 20-01- 2018 à 22 :40
- [5] Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S.A., 2010. A new method for assessing domino effect in chemical process industry. Journal of Hazardous Materials 182, 416–426
- [6] Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S., 2005. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. Journal of Hazardous Materials 127, 14–30.
- [7] Reniers, G.L.L., 2010. An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters. Journal of Hazardous Materials 177, 167–174.
- [8] Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V., 2009. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, 614–624.
- [9] INERIS, 2004, Guide technique relatif aux valeurs seuils des effets des phénomènes accidentels des installations classées.
- [10] Lees, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries, second ed. ButterworthHeinemann, Oxford.
- [11] Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2011. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches. Journal of Reliability Engineering and System Safety 96, 925–932.

- [12] C. Guedes Soares, 2010, Safety and Reliability of Industrial Products, Systems and Structures, CRC press Taylor & Francis Group.
- [13] Guideline for developing quantitative risk criteria, 2009, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [14] Règle d'organisation APSAD R6, maîtrise du risque incendie, organisation et système de management, édition novembre 2009.
- [15] Mémoire de fin d'étude de ABBAS Nazim et HAMITOUCHE Mohamed Issam intitulé Approche analytique de la gestion globale des risques au sein de General Electric.
- [16] Mémoire de fin d'étude de BELKEBIR Imene Tassadit intitulé Maîtrise des risques majeurs au niveau de four sous-vide. Cas: centre de maintenance de la turbo machinerie GE.
- [17] Mémoire de fin d'étude de DJEBBAR Racha et HIMRANE Ouail intitulé Modélisation, simulation numérique et étude de la sûreté de fonctionnement en vue de la maîtrise des risques majeurs - Cas station de coating de GE Oil & Gas Algesco.
- [18] Règle d'organisation APSAD R6, maîtrise du risque incendie, organisation et système de management, édition novembre 2009.
- [19] Manuel d'utilisation Pathfinder® 2016.
- [20] PEMEX LPG Terminal, Mexico City, Mexico. 19 November 1984 - Health and Safety Executive
- [21] Advantage Magazine ANSYS, <https://www.ansys.com>, consulté le 16-06-2018 à 16h30.
- [22] Guide d'utilisation PyroSim® 2018.
- [23] Climat Boufarik, <https://www.meteoblue.com>, consulté le 30-05-2018 à 12h00.
- [24] Dirk Helbing & Evangelos Pournaras (2015) Share/bookmark Society: Build digital democracy [archive], Nature, 2015-11-02.
- [25] Étude L'Internet des objets [archive], par Pierre-Jean Benghozi et Sylvain Bureau (Pôle de recherche en Économie et Gestion de l'École Polytechnique) et Françoise Massit-Folléa (programme Vox Internet II).

Annexes

ANNEXE I : Catastrophe de Mexico, 1984

Le 19 novembre 1984 à environ 5h30, un énorme incendie et des explosions en série se produisent sur le parc de stockage du terminal de distribution de GPL de San Juan Ixhuatepec, dans la banlieue de Mexico. Environ 600 personnes y ont trouvé la mort, 200 000 ont été évacuées et le terminal totalement détruit. Le souffle des explosions a été enregistré jusqu'à 20 km de distance sur un sismographe et l'explosion la plus violente a atteint 0.5 sur l'échelle de Richter. La majorité des victimes et des blessés habitaient à à peine 130 m des limites du site.

La cause véritable de la catastrophe n'a jamais été totalement établie étant donné les dommages occasionnés et l'absence de témoignage fiables. On suppose toutefois que l'origine est une fuite de GPL d'un bac de stockage ou d'une tuyauterie dans un espace confiné par des murs. Le nuage de gaz inflammable formé (2 m de haut) aurait été allumé par une torche située à hauteur du sol.



Figure I.1 Catastrophe de Mexico 1984

Il y a des éléments tangibles qui laissent entendre que les bacs auraient débordé, conduisant à un envoi massif de GPL dans le réseau de torche. La fuite initiale proviendrait du débordement ou de la surpression d'un de ces bacs.

De nombreux facteurs ont contribué à l'ampleur du désastre et à ces effets dominos, à commencer par la conception du terminal (espacement inadéquat des différents stockages, systèmes de détection de gaz déficient, absence de protection passive contre le feu), la destruction du système d'extinction par les explosions, la mauvaise maintenance d'équipements de sécurité et la présence d'un grand nombre d'habitants de l'immédiate proximité du terminal. Même si de nombreux facteurs de conception ont contribué au désastre, plusieurs problèmes de sécurité avaient été également rapportés par le comité de sécurité de l'usine [20]

- Mauvais entretien,
- 30 à 40% des organes de sécurité, dont les rideaux d'eau, inopérants ou bypassés,
- Soupape manquante sur une clarinette de distribution de GPL,
- Manomètre inopérants et mal entretenus.

ANNEXE II : Présentation du logiciel ANSYS Structural®

Le groupe ANSYS® offre une série complète de logiciels qui couvre toute la gamme de la physique, donnant accès à pratiquement tous les domaines de la simulation technique qu'exige un processus de conception. La dynamique explicite des logiciels permet de résoudre des problèmes complexes. Elle permet également d'obtenir des réponses rapides grâce à la facilité d'utilisation du programme. Les méthodes de solution de pointe et les modèles de matériaux extensifs produisent des résultats précis.

Il est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

L'outil que nous avons utilisé est ANSYS STRUCTURAL, qui fournit toute la puissance de la non-linéarité des capacités structurelles - ainsi que toutes les capacités linéaires - pour fournir des simulations de haute qualité et une fiabilité des résultats de simulation de structure.

Le logiciel permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont [21]

- l'analyse statique
- l'analyse modale
- l'analyse harmonique (réponse forcée)
- l'analyse temporelle
- la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

La version utilisée dans ce mémoire est ANSYS 18.2. L'interface du logiciel est présentée dans la figure II.1

ANNEXE III : Présentation du logiciel PyroSim®

PyroSim® est une interface graphique évoluée et ergonomique FDS (Fire Dynamics Simulator). Il permet de créer et de gérer en détail des modèles complexes d'incendie, mais aussi de tout type de circulation d'air. La version utilisée pour ce mémoire est PyroSim® 2018.

Le logiciel présente les avantages suivant : [22]

- Le logiciel permet l'importation des fichiers AutoCAD DXF et DWG, mais aussi FBX et OBJ. Lors de l'importation, il traite toutes les données de type surfaces 3D comme des obstructions et toutes les autres données (lignes, courbes, etc.) comme des données de CAO séparées.
- Il permet aussi d'importer des fichiers GIF, JPG ou PNG utilisables en fond d'écran pour aider à définir les espaces directement en surimpression des images importées.
- La gestion de plusieurs maillages dans un même modèle est possible. Cette gestion multi-zones permet : d'utiliser des calculs parallèles afin d'obtenir plus rapidement des solutions, de rendre le maillage très proche de la géométrie et ainsi réduire le nombre de cellules tout comme le temps de calcul, et enfin de modifier la résolution des différents maillages pour mettre en avant les espaces les plus pertinents.
- Disponibilité de bibliothèques de propriétés de matériaux combustibles avec possibilité de personnalisation et d'importation dans des modèles spécifiques. Ce qui permet l'accélération du processus de création de modèles et la réduction des erreurs potentielles. Les bibliothèques comportent des réactions, des détecteurs de chaleur, des matériaux, des surfaces et divers autres paramètres.
- Utilitaire Smokeview ; à n'importe quel moment durant l'analyse, il est possible de lancer le programme Smokeview conçu par le NIST (National Institute of Standards and Technology) et qui permet de visualiser la fumée, les températures, vitesses, toxicité et autres informations produites par l'analyse FDS. PyroSim supporte également le tracé dynamique de courbes historiques XY.

ANNEXE IV : Risque sociétal

L'annexe IV représente un complément d'informations à la section II.2.1.10.2. Elle est extraite du livre « Guidelines for developing quantitative safety risk Criteria », et explique l'utilisation des courbes F-N pour le risque sociétal et les critères d'acceptation à travers deux études de cas :

L'objectif d'une QRA est de fournir de l'information aux décideurs pour leur permettre de prendre des décisions rationnelles en matière de gestion des risques.

Avant de discuter la tolérance des risques, il est important de fournir une définition explicite de la tolérabilité. L'HSE du Royaume-Uni a écrit : "tolérable" ne signifie pas "acceptable". Il s'agit plutôt d'une volonté de la société dans son ensemble de vivre avec un risque afin d'obtenir certains avantages dans l'assurance que le risque est correctement contrôlé. Cependant, cela n'implique pas que tout le monde accepterait sans réserve de prendre ce risque".

Le concept de tolérance au risque ou de tolérabilité au risque est de plus en plus préféré au concept d'acceptation du risque. La terminologie a changé parce que les organisations ne veulent pas laisser entendre ou créer une perception publique que les risques attribuables à leurs opérations ou activités sont considérés comme étant acceptables. Conscients qu'il est impossible d'éliminer tous les risques, certains organismes préfèrent parler de risques résiduels soigneusement gérés et tolérables.

Estimation de l'acceptabilité du risque, cas du Royaume-Uni

L'origine des critères de risque sociétaux au Royaume-Uni remonte à la fin des années 1970 (HSE 1998). **Le Comité consultatif sur les risques majeurs (ACMH 1976)** a suggéré en 1976 qu'un accident grave (une plante particulière) était susceptible de se produire plus souvent qu'une fois en 10 000 ans, ce qui pourrait être considéré à la frontière de l'acceptabilité.

Cela a souvent été pris comme un point d'ancrage pour la courbe F-N où le risque d'accident entraînant 10 décès ou plus ne devrait pas dépasser 1 sur 10 000 par an.

Dans le deuxième rapport **Canvey (HSE 1981)**, il a été suggéré qu'un événement avec 1500 morts et la fréquence de 2×10^{-4} par an (2 sur 10 000) pourrait être jugé comme

intolérable. La pente proposée de la courbe FN était de -1 (pas d'aversion pour le risque), basé sur l'historique pour l'industrie chimique.

Dans l'étude (ACMH 1991) il a été cité comme un niveau maximum tolérable de risque une droite de pente -1 passant par les points $N=500$ et $F=2 \times 10^{-4}$ par an. Cependant, il est suggéré par le HSE (HSE 2001) que le risque d'un seul accident causant la mort de 50 personnes ou plus avec la fréquence de 1 à 5000 par an peut être considéré comme intolérable.

Le niveau le plus acceptable de risque est suggéré comme une droite inférieure de trois décennies à la ligne supérieure tolérable.

Cette évolution du niveau tolérable supérieur de risque sur 20 ans est présentée sur la figure 1, et démontre clairement la valeur de l'approche d'établissement d'objectifs en réduisant le niveau supérieur de tolérabilité du risque.

Cette approche est basée sur l'accident avec le plus grand nombre de décès (N_{max}) et sa fréquence $f(N_{max})$, qui sont utilisés pour évaluer une approximation de la perte potentielle de vie (PLL), en utilisant l'exposant d'aversion au risque de 1,4 (pente de -1,4).

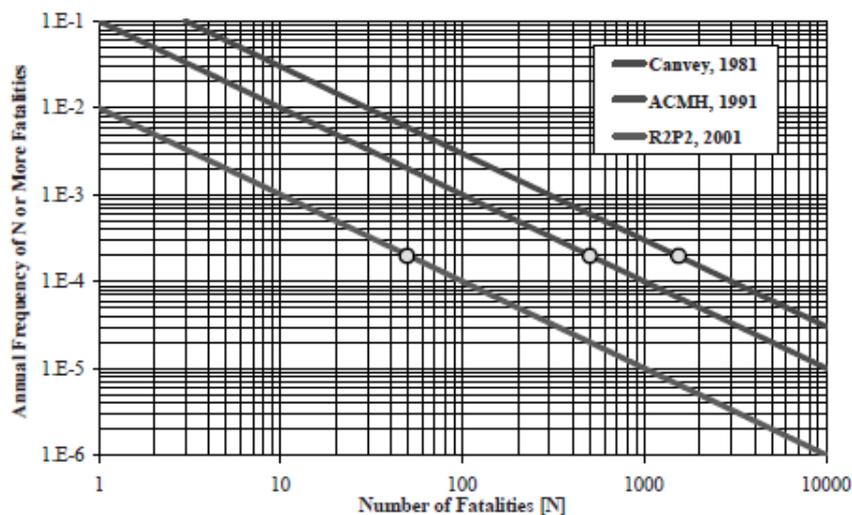


Figure IV. 1. Evolution du niveau de tolérabilité de risque

Estimation de l'acceptabilité du risque, cas du Honk Kong

Hong Kong, et face aux développements résidentiels à haute densité situés près des installations dangereuses, principalement pour les activités de stockage du GPL en vrac, sur l'île de Tsing Yi, a commandé une étude sur les risques majeurs en 1981. [Kolluru 19961]

Le Comité de coordination de la planification et du contrôle des installations potentiellement dangereuses (CCPHI) a été créé en 1986 pour coordonner la politique de gestion des risques du gouvernement. Des critères de risque provisoires ont été établis en 1988 [Ball 1998 and Boulton 2001], formalisés et ajoutés aux normes et directives de planification de Hong Kong [HKPD 2001 en 1993].

Les critères individuels de risque et de risque sociétal sont présentés dans le Tableau B.2 et la Figure B.2. Hong Kong ne spécifie pas de critère de risque globalement acceptable pour le risque individuel et ne spécifie pas l'application du principe «As Low As Reasonably Practicable» (ALARP) au risque individuel.

Alors que certaines études de risques préliminaires proposaient des critères de risque pour le transport de marchandises dangereuses, aucun critère de risque n'existe actuellement pour les risques de transport.

La QRA appliquée pour le cas de Hong Kong a été requise par deux départements différents, le Département de la planification et le Département de la protection de l'environnement (EPD). Les mêmes critères de risque sont utilisés pour les demandes de permis d'installation et d'aménagement du territoire. Du point de vue de la planification de l'utilisation des terres, le Service de la planification surveille la conformité aux exigences relatives aux installations potentiellement dangereuses (PHI). Les ISP sont définis comme des installations qui stockent des matières dangereuses en quantités égales ou supérieures aux quantités seuil (QS) établies. Ces QS étaient initialement fondées sur le règlement de 1982 sur la notification des installations dangereuses pour la manutention des installations au Royaume-Uni ; cependant, certains contingents tarifaires ont été révisés pour tenir compte de considérations propres à Hong Kong.

Voici des exemples d'ISP communs et de substances et de QT connexes :

- Installations de stockage de GPL, 25 tonnes
- Installations de gaz de ville, 15 tonnes
- Stockage de chlore, 10 tonnes ou tout stockage en fûts d'une tonne
- Essence ou naphta Stockage d'oxygène liquide, 500 tonnes
- Usines d'explosifs dépôts de stockage gouvernementaux, n'importe quelle quantité

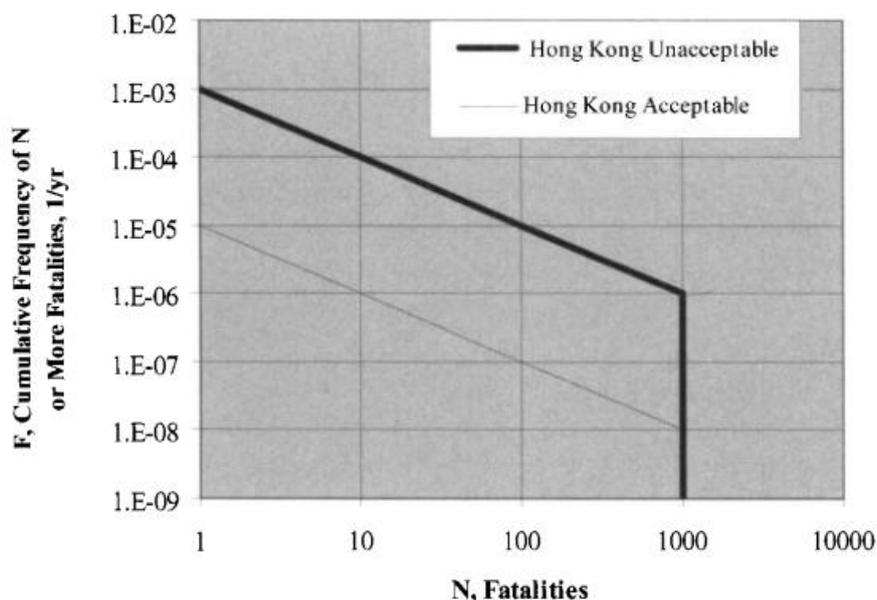


Figure IV. 2. Courbe d'acceptation appliquée à Hong Kong

Chaque (PHI) identifiée à une zone de contrôle environnante, à l'intérieur de laquelle la planification de l'utilisation des terres est requise. Chaque PHI nécessite une QRA, que Hong Kong appelle une évaluation des dangers.

Sur la base des résultats de l'évaluation des dangers, une étude de planification est menée pour examiner les propositions actuelles et futures d'utilisation et d'aménagement du territoire afin d'identifier les considérations de planification appropriées et les contrôles de développement dans la zone de contrôle.

Les risques pour les développements proposés sont évalués par rapport aux critères de risque, dans le cadre de l'examen de la demande. Du point de vue de l'agrément des installations, l'EPD surveille la conformité à l'Ordonnance sur l'évaluation des incidences sur l'environnement (EIAO). (HKEPD 2008).

Comme indiqué dans un mémorandum technique expliquant les exigences EIAO, les évaluations des risques doivent être effectuées pour les installations qui fabriquent, entreposent, utilisent ou transportent des marchandises dangereuses, si les impacts de l'exploitation "peuvent avoir des effets nocifs sur la santé publique. . » (HKEPD 2008)

Les exemples d'installations qui nécessitent des permis environnementaux et qui sont donc soumises à une évaluation d'impact sur l'environnement comprennent, sans toutefois s'y limiter : (HKEPD 2008)

- Une raffinerie de pétrole
- Un produit chimique ou une usine biochimique d'une capacité de stockage supérieure à 500 tonnes et dans laquelle des substances sont transformées ou produites
- Une usine pétrochimique d'une capacité de production annuelle supérieure à 70 000 tonnes
- Une installation de stockage chimique en vrac d'une capacité de stockage supérieure à 80 000 tonnes

Hong Kong a suivi l'expérience du Royaume-Uni en développant ses critères de risque (Ball 19981).

La courbe F-N du risque sociétal pour le risque maximal tolérable (10, -1) tire son point d'ancrage du rapport du Comité consultatif sur les risques majeurs (CCSM). (HSC 19761)

La courbe du risque acceptable est inférieure de deux ordres de grandeur. Les deux courbes définissant les critères de risque sociétaux se terminent à une valeur N de 1 000.

Compte tenu des faibles quantités seuil illustrées ci-dessus pour la classification en tant que PHI, ces critères de risque peuvent s'avérer difficiles à atteindre pour les installations à plus grande échelle. Aucune discussion n'a été trouvée dans la littérature sur la facilité ou la difficulté relative à l'application de ces critères de risque aux nouvelles installations à plus grande échelle nécessitant des études d'impact sur l'environnement (EIE). Cependant, le processus de planification à Hong Kong semble efficace pour détourner les nouveaux développements industriels à haut risque vers des endroits éloignés où il est plus facile de satisfaire aux critères de risque sociétaux.

Un processus ALARP moins rigoureux tendrait à compenser le conservatisme supplémentaire des critères de risque sociétaux. Hong Kong a également proposé l'utilisation de QRA pour évaluer l'adéquation des contrôles visant à atténuer les risques de glissement de terrain. Le département Génie Civil et Développement a proposé des critères de risques spécifiques à cette évaluation. (HK-CEDD 20071).

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1

Accidents involving domino effect, 1917–2009 (F: fire; MaE: major explosion; MiE: minor explosion).

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
1.	1917	Ashton, UK	Explosives factory/nitrator	Spillage of hot HNO ₃ → F → MaE → F	46	>120	Some 100 houses demolished	Billings & Copland, 1992
2.	1917	Novo Scotia, Canada	Ammunition ship	Collision with another ship → F → MaE	1800	8000	500 Totally blinded; massive property damage	Assheton, 1930
3.	1933	Neunkirchen, Germany	Gasholder/towns gas	MiE → rupture of pipeline → F → MaE	65	'Several hundred'		Kier & Muller, 1983
4.	1936	Saint Chamas, France	TNT production unit/TNT	F → MaE	53	150		MHIDAS, 2009
5.	1943	Ludwigshafen, Germany	BASF works/rail tank car	Leak → VC → MaE	57	439		Marshall, 1987; Nash, 1976
6.	1944	Cleveland, USA	Liquefaction plant/LNG	Tank rupture & leak → F → series of MaE	128	200–400	Severe damage to the plant and property	Marshall, 1987; Nash, 1976
7.	1947	Texas, USA	Ship/ammonium nitrate	F → MaE → MaE	552	>3000	More than 3300 dwellings and 130 business building damaged, 600 automobile and 360 box car damaged, several storage tanks destroyed	Marshall, 1987; Nash, 1976; National Board of Fire Underwriters, 1948; Wheaton, 1948
8.	1948	Ludwigshafen, Germany	Tank car/dimethyl ether	Tank rupture & dispersion of contents → VC MaE → F	207	3818		Lewis, 1993; Marshall, 1987
9.	1949	Perth Amboy, USA	Asphalt tank	MaE → F	4	–		MHIDAS, 2009
10.	1951	Port Newark, USA	LPG storage/propane	F → MiE → several BLEVEs	0	14	73 Bullet tanks were destroyed, missiles demolished a filling station and ruptured underground water main	Lewis, 1993.
11.	1951	Baton Rouge, USA	Refinery/naphtha	VCE → multiple explosions	2		6.5 Million property damage	Lenoir & Davenport, 1993
12.	1952	Bound Brook, USA	Phenolic resin plant/phenolic resin powder	Powder smouldering due to overheating → MaE → MaE → MaE VCE → three explosions	5	21		Lewis, 1993
13.	1953	Campana, Argentina	Refinery/recovery unit/gasoline	F → F	–	–		Lenoir & Davenport, 1993
14.	1953	Miami, USA	Storage unit/LPG	MiE → MaE	4	–		MHIDAS, 2009
15.	1954	Lake Port, USA	Storage area/LPG	MiE → MaE	4	–		MHIDAS, 2009
16.	1955	Whiting, USA	Refinery/hydroformer unit/naphtha	MaE → F	2	40		Lenoir & Davenport, 1993; Lewis, 1993; Mahoney, 1990; Woodworth, 1955
17.	1957	Montreal, Canada	Storage tanks/butane	VC → F → 3 BLEVEs	1		3 Storage tanks damaged	Kier & Muller, 1983
18.	1957	Meraux, USA	Storage tank/diesel oil	Tank collapse → severe fire	1	–		MHIDAS, 2009
19.	1958	Boron, USA	Tank truck/LPG	F → MaEs	1	–		MHIDAS, 2009

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
20.	1958	Signal Hill, USA	Refinery/visbreaker plant/oil	Tank eruption → F	2	18		Lewis, 1993; Woodworth, 1955
21.	1959	Deer Lake, USA	Road tanker/LPG	LPG leak and ignition → F → BLEVE	11	10		Kier & Muller, 1983
22.	1959	Mac Kittrick, USA	Storage area/LPG	MiE → BLEVE	–	2		MHIDAS, 2009
23.	1960	Bakersfield, USA	Storage tank/caustic	MiE → F	–	–		MHIDAS, 2009
24.	1961	Perry, USA	Tank truck/LPG	F → MaEs	–	–		MHIDAS, 2009
25.	1962	Pampa, USA	Refinery/isopentane	MiE → F	–	1		MHIDAS, 2009
26.	1962	Doe Run, USA	Ethanolamine plant/ethylene oxide	Internal explosion due to runaway → VC	1	21		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
27.	1962	Marietta, USA	Phenol production plant/benzene	Discharge of benzene through relief valve → VC damage pipework → F	1	3		Mahoney, 1990
28.	1962	Ibbenburen, Germany	Pipeline/hydrogen	MiE → F and toxic release	–	1		MHIDAS, 2009
29.	1963	Evanston, USA	Warehouse/methanol	F → Toxic release	–	1		MHIDAS, 2009
30.	1964	Attleboro, USA	Vinyl chloride polymerization plant/vinyl chloride	Leak → E → MaE	7	40		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
31.	1964	Niigata, Japan	Refinery/oil	Oil spillage F → E → F	2	–	97 Storage tanks destroyed	Mahoney, 1990
32.	1964	Liberal, USA	Compressor station/propane	VCE → multiple explosions	–	–	0.5 Million property damage	Lenoir, 1993
33.	1965	Louisville, USA	Neoprene plant/mono vinyl acetylene	Decomposition of mono vinyl acetylene due to overheating → MaEs	12	8		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
34.	1965	Carthage, USA	Process plant/oil	F → MaE and F	–	–		MHIDAS, 2009
35.	1966	Feyzin, France	Refinery storage tanks/propane	Propane leak → F → MaE	18	81	Five spheres destructed	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
36.	1967	Lake Charles, USA	Refinery/iso butane	MaE → major F	7	13		Health and Safety Executive, 1978; Marshall, 1977
37.	1968	Romford, UK	Naphtha	(jet)F → F	–	–		MHIDAS, 2009
38.	1968	Milford Haven, UK	Refinery/hydrocarbons	MiE → F	–	–		MHIDAS, 2009
39.	1968	Port Arthur, USA	Storage tank/petrol	MiE → F	3	5		MHIDAS, 2009
40.	1968	Pernis, Netherlands	Refinery/hydrocarbon vapour	Overflow lead to VC → MaE → F	2	85		Fontein, 1968; Lewis, 1993; MSAPH report, 1968
41.	1968	Leverkusen, Germany	Formamidinesulphinic acid plant/urea	F → MaE	1	14		MHIDAS, 2009
42.	1969	Dormagen, Germany	Ethylene oxide plant/ethylene oxide	MaE → MaE	1	40		MHIDAS, 2009
43.	1969	Glendora, USA	Rail tank car/vinyl chloride	Tank derailment and leak → series of Fs and Es	–	1		Kier & Muller, 1983; Slater, 1978

(continued on next page)

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
44.	1969	Laurel, USA	LPG tank cars/LPG	Tank derailment lead to serial tank explosions and fireballs	2	>33	Structural damage within 400 ft. Almost all glasses were shattered within half a mile	Eisenberg, Lynch, & Breeding, 1975; Lenoir & Davenport, 1993
45.	1969	Répcelak, Hungary	Carbonic acid/storage/purified CO ₂	MaE → MaEs	9	15		Chiles, 2001
46.	1969	Round Brook, USA	Reactor/nitrophenol	MiE → MaE	1	1		MHIDAS, 2009
47.	1969	Geary, USA	Rail tank car/butane	F → BLEVE	–	–		MHIDAS, 2009
48.	1969	Long Beach, USA	Tank/petrol	F → MaE	1	83		MHIDAS, 2009
49.	1969	Texas City, USA	Petrochemical/butadiene	Detonation → VCE	3		30 Million property damage	Lenoir & Davenport, 1993
50.	1970	Beaumont, USA	Oil slope tank/oil	Tank failure and oil spillage → F → F in other 16 tanks nearby				Mahoney, 1990
51.	1970	Crescent, USA	Rail tank car/propane	Propane leak → F → serial MaEs		66		Lewis, 1993; Strehlow, 1973; Watrous, 1970.
52.	1970	Ludwigshafen, Germany	Transportation/propylene	VCE → F and MaE	5	3	2 Barge caught fire and sunk	MHIDAS, 2009
53.	1970	Big springs, USA	Refinery/alkylation/hydrocarbon vapors	VCE → MaE	–		Property damage worth \$9.7 million	Lenoir & Davenport, 1993
54.	1970	Linden, USA	Refinery/hydrocracking/oil	Physical explosion → VCE and fire	–		Property damage worth \$ 87.6 million	Lenoir & Davenport, 1993
55.	1971	Baton Rouge, USA	Road tanker/ethylene	Physical E → F	–	21		MHIDAS, 2009
56.	1971	Houston, USA	Rail tank car/vinyl chloride monomer	Tank derailment and punctured → serial tank explosions and fires	1	5		Eisenberg et al., 1975; Lewis, 1980
57.	1971	Longview, USA	Polyethylene plant/ethylene	Gas pipe broke → VC → rupture of other ethylene pipelines → VCs	4	60		Eisenberg et al., 1975; Lewis, 1980
58.	1972	Yokkaichi, Japan	Rubber plant/waste water treatment unit/waste water	MiE → F and reactor rupture	–	–		MHIDAS, 2009
59.	1972	Rio de Janeiro, Brazil	Refinery/storage area/LPG	MiE → BLEVE	37	53		Mahoney, 1990
60.	1972	Duque de Caxias, Brazil	Storage tank/LPG	VCE → BLEVE → series of explosions	39	51		MHIDAS, 2009
61.	1973	Kingman, USA	Rail tank car/propane	(Jet) F → BLEVE and fireball	13	More than 90		Marshall, 1987
62.	1974	Climax, USA	Rail tank car/vinyl chloride monomer	Tank derailment and VCM leak → VC → F → BLEVE				Eisenberg et al., 1975
63.	1974	Beaumont, USA	Hydrocarbons	VCE → F and MaE	2	10		MHIDAS, 2009
64.	1974	Petal, USA	Terminal/salt dome storage/butane	MiE → MaE	–		Glass breakage up to 11 km	Lenoir & Davenport, 1993
65.	1975	Eagle Pass, USA	Transportation/LPG	VCE → fire and another VCE	17			Lenoir & Davenport, 1993
66.	1975	Philadelphia, USA	Storage area/fuel oil	Overfilling → VCE → major F	–	–		MHIDAS, 2009

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
67.	1975	Beek, Netherlands	Ethylene plant/propylene	VC → F (numerous fires)	14	104 (Inside the factory); 3 (outside)	Damage in a radius of 4.5 km, 6 tanks burned, control room demolished	Lewis, 1980, MSARE, 1976; Van Eijnatten, 1977
68.	1975	Avon, USA	Coking unit/drum/ crude oil	F → F	–	–		MHIDAS, 2009
69.	1976	Geismar, USA	Petrochemical plant/polyglycol ether reactor/ethylene oxide and propylene oxide	MaE → major F	–	–		Mahoney, 1990
70.	1976	Baton Rouge, USA	Chemical plant/natural gas	MaE → toxic release	–	–		MHIDAS, 2009
71.	1976	Addyston, USA	Storage area/methanol	MaE → F	–	–		MHIDAS, 2009
72.	1976	Guayaquil, Ecuador	Tanker/LNG	VCE → series of explosions	–	>50		MHIDAS, 2009
73.	1977	Puebla, Mexico	Storage bullets/vinyl chloride monomer	VCM leakage → VCF → 4 BLEVEs	1	3		Lewis, 1993.
74.	1977	Westwego, USA	Grain silo/grain dust	MaE → MaE → MaE	36	10		Lewis, 1993.
75.	1977	Galveston, USA	Grain silo/grain dust	MaE → MaE → MaE	15			Kier & Muller, 1983; Marshall, 1987 MHIDAS, 2009
76.	1977	Romeoville, USA	Refinery/storage area/diesel fuel	F → F	–	–		MHIDAS, 2009
77.	1978	Abqaiq, Saudi Arabia	Gas processing unit/methane	Gas leak due to internal corrosion → VC → (a pipe section struck a LPG spherical tank → release & VCE)				Mahoney, 1990
78.	1978	Texas, USA	LPG storage tanks/LPG	Crack due to internal overpressure led to LPG leak → F → BLEVE	7	10		Mahoney, 1990
79.	1979	Pittsfield Township, USA	Road tanker/propane	Leakage → series of explosion	–	–		MHIDAS, 2009
80.	1979	Mississauga, Canada	Rail tank car/propane, etc	Tanks derailment and F → BLEVEs and toxic release				Amyot, 1980; Lewis, 1993; Mississauga, 1979 MHIDAS, 2009
81.	1979	Tacoma, USA	Hydrogen compression system/hydrogen	MaE → toxic release	–	3		MHIDAS, 2009
82.	1979	Ras Tanura, Saudi Arabia	Refinery/storage tank/petrol	MaE → F	2	6		MHIDAS, 2009
83.	1979	Priolo, Italy	Plastic plant/cumene	F → F	1	–		MHIDAS, 2009
84.	1979	Milligan, USA	Train of tank cars containing ammonia, acetone, chlorine, etc	Derailment → MaEs → F/Tox	0	14	4500 People evacuated; damage worth \$ 1.26 million	MHIDAS, 2009
85.	1980	Deer Park, USA	Ship/vacuum distillate	MaE → F	3	12		MHIDAS, 2009
86.	1980	Bienville, France	Chemical storage depot/resins, acetates, solvents	MiE → F	–	–		MHIDAS, 2009

(continued on next page)

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
87.	1980	Borger, Texas, USA	Refinery/alkylation unit/light HCs	Vessel rupture and HC release → VC		41	Blast destroyed the alkylation unit, whole refinery shutdown	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
88.	1980	Salina Cruz, Mexico	Storage tank/oil	Lightening → F → F	–	–		MHIDAS, 2009
89.	1980	Deer Park, USA	Phenol plant/cumene	F → F	–	–		MHIDAS, 2009
90.	1981	South Hutchinson, USA	Railcar/ammonia	F → MaE	–	–	500 People evacuated	MHIDAS, 2009
91.	1981	Montana, Mexico, USA	Rail tank car/chlorine	Tanks derailment → MaEs	17	1000		Marshall, 1987
92.	1981	West Glamorgan, UK	Refinery/propane	MiE → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
93.	1982	Livingston, USA	Freight train/ petrochemical products	Tank derailment → several explosions	–	–		NTSB annual report, 1983
94.	1982	Philadelphia, USA	Storage tank/cumene	MaE → F	–	–		MHIDAS, 2009
95.	1982	Houston, USA	Tank truck/propane	F → F	–	3		MHIDAS, 2009
96.	1982	Caracas, Venezuela	Electricity company/ storage/oil	E → F → boilover	150	>500		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
97.	1983	Milford Haven, UK	Refinery/storage tank/ crude oil	F → 2 boilovers	–	20		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
98.	1983	Houston, USA	Chemical plant/ methyl bromide	Physical E → toxic release	2	Several	2 Blocks were evacuated	MHIDAS, 2009
99.	1983	Port Neches, USA	Ship/diesel fuel	F → MaEs	–	–		MHIDAS, 2009
100.	1983	Dursley, UK	Diesel engine production plant	F → toxic release	–	5	Hundreds of people evacuated	MHIDAS, 2009
101.	1983	Baton Rouge, USA	Plastic plant/vinyl chloride monomer	MaE → F	–	2	1500 People evacuated	MHIDAS, 2009
102.	1983	Swindon, UK	Process plant/resin	F → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
103.	1983	Dalhousie, Canada	Electrolysis plant	MiE → toxic release	–	–		MHIDAS, 2009
104.	1983	Newark, USA	Storage area/ unleaded gasoline	Tank overfilling → MiEs → MaE	–	–		PressTV, 2009
105.	1984	Las Piedras, Venezuela	Refinery/hydrogen plant/oil	Oil line fractured → F → F (jet fire of a gas pipe)	–	–		Mahoney, 1990
106.	1984	Mexico city, Mexico	Storage tanks/LPG	Line rupture and LPG leak → VC → F → BLEVEs	650	6400	Severe damage to nearby houses, \$ 31 million damage	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
107.	1984	Romeoville, USA	Refinery/absorption column/propane, butane	Column crack → VC → MaE	17	31	Damage to electrical power supply system and fire extinguishing systems	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
108.	1985	Bombay, India	Port warehouse/ chemicals	Chain of explosions → major F	–	–	Entire storage complex devastated, a barge caught fire due to flying missiles	MHIDAS, 2009
109.	1985	San Antonio, USA	Storage tank/ammonia	MaE → toxic release	4	23	20 People evacuated	MHIDAS, 2009
110.	1985	Priolo, Italy	Ethylene plant/ deethanizer column/ ethylene	Relief system operated → ethylene discharge → F → MaE → tank collapse and more MaEs	–	–		Mahoney, 1990

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
111.	1985	Naples, Italy	Transportation/oil	MaE → F	4	170		MHIDAS, 2009
112.	1985	Algeciras, Spain	Ship/naphtha	MaE → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
113.	1985	Naples, Italy	Petroleum terminal/oil	Tank overfilling → VC → major F	4	170		MHIDAS, 2009
114.	1986	Petal, USA	Pipeline/LPG	MiE → MaE and fireball	–	12	Residents in 2 mile radius evacuated	MHIDAS, 2009
115.	1986	Thessaloniki, Greece	Oil terminal/oils	Oil spillage and F → several Fs				Browning & Searson, 1989
116.	1987	Antwerp, Belgium	Ethylene oxide plant/distillation column/ethylene oxide	EO decomposition and internal explosion → F		14		Lenoir & Davenport, 1993
117.	1987	Port Herriot, France	Storage tanks/oil	Oil spray and flash → F → MaEs	2	8		Mansot, 1989
118.	1987	Genoa, Italy	Storage facility/ methanol and hexane	F → MaEs	4	1	60 Families and local school evacuated	MHIDAS, 2009
119.	1987	Ciudad Madero, Mexico	Refinery/gasoline	MiE → F	–	–	3000 Residents evacuated	MHIDAS, 2009
120.	1987	Pampa, USA	Petrochemical/ acetic acid plant/ butane	Detonation → VCE	3		Property damage worth \$ 210 million	Lenoir & Davenport, 1993
121.	1988	Perth Amboy, USA	Road tanker/ hexane	F → F	1	–		MHIDAS, 2009
122.	1988	Bombay, India	Storage tank/ benzene	MiE → F	35	16		MHIDAS, 2009
123.	1988	Kings Ripton, UK	Storage/LPG	F → BLEVE	–	–		MHIDAS, 2009
124.	1988	Brisbane, Australia	Chemical factory/ detergent	MiE → toxic release	–	30		MHIDAS, 2009
125.	1989	Antwerp, Belgium	Ethylene oxide plant/ distillation column/ ethylene oxide	Internal explosion → pipework fractured and flame flashed back to another column → internal explosion		5		Kletz, 1990; Mahoney, 1990
126.	1989	Pasadena, USA	Polyethylene plant/HCs	Hydrocarbon vapour release → VC → MaEs (a storage tank and a reactor)	24	>130		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
127.	1989	Jonova, Lithuania	Ammonia storage/ ammonia	Ammonia tank rupture → Fs and toxic dispersion	7	57	32,000 Person evacuated	Andersson, 1991; Kletz, 1990
128.	1989	Al Hillah, Iraq	Transportation/ explosives	MaE → F	19	–		MHIDAS, 2009
129.	1989	Baton Rouge, USA	Refinery/ethane and propane	MiE → F	–	–		Mahoney, 1990
130.	1990	Stanlow, UK	Batch reactor/ chemical mixture	(Jet) F → MaE and fireball	1	5		Lewis, 1993
131.	1990	Sydney, Australia	LPG terminal/LPG	Gas Leak → F → BLEVEs				MHIDAS, 2009
132.	1990	St. Peters, Australia	Gas depot/LPG	MaE → fireball → MiEs	–	–		MHIDAS, 2009
133.	1991	Coatzacoalcos, Mexico	Petrochemical complex/vinyl chloride plant	MiE → MaE	–	–		Mahoney, 1990

(continued on next page)

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
134.	1992	La Mede, France	Refinery/hydrocracker unit/hydrocarbon and hydrogen	MaE → F and MiEs			US\$ 180,000,000	The 100 Largest Losses, 2003
135.	1992	Bradford, UK	Chemical warehouse/ azodiisobutyronitrile	AZDN containers ruptured → MiE → Fs		33	Significant air and water pollution Extensive property damage	Health and Safety Executive, 1993 Health and Safety Executive, 1994
136.	1992	Castleford, UK	Chemicals	Jet F → Fs	–	–		
137.	1993	Ringaskiddy, Ireland	Pharmaceutical facility	MaE → large F	–	32		Multinational Monitor, 2009
138.	1993	Shenzhen, China	Warehouse/ ammonium nitrate	MaE → MaE	15	141		Guoshun, 2000
139.	1993	Jacksonville, USA	Petroleum terminal/ unleaded gasoline	F → tank overflow → several pool fires	1			Emars, 2009
140.	1994	Bel Pre, USA	Petroleum plant/ thermoplastic rubber product	MiE → F → MaE			Two buildings and a tank farm caught fire £ 48 Million damage	Health and Safety Executive, 1993 HSE, 2009
141.	1994	Milford Haven, USA	Texaco refinery/HCs	Pipe failure → hydrocarbon release → MaE → Fs → flare relief damage → F		26		
142.	1994	Sioux City, USA	Ammonium nitrate plant/nitric acid	MaE → toxic release	5	18	2500 People evacuated	MHIDAS, 2009
143.	1994	New Delhi, India	Transportation/ nitrocellulose	MaE → major F	8	2		MHIDAS, 2009
144.	1994	Ueda, Japan	Storage tank/ gasoline	MaE → MaE	1	3	70 Residents evacuated	MHIDAS, 2009
145.	1995	Kucove, Albania	Storage tank/ crude oil	F → MaE	1	4		MHIDAS, 2009
146.	1995	Volgograd, Russia	Rail tanker/ propane	F → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
147.	1995	Savannah, USA	Chemical storage & transfer facility	F → toxic release			Nearby town evacuated, environmental impact (fish kill)	EPA, 1998
148.	1996	Paese, Italy	LPG loading terminal/LPG	Flash fire → explosion and pool fire → BLEVEs → fireballs	–	–		Zenier, Antonello, Dattilo, & Rosa, 2001
149.	1996	Martinez, USA	Hydrogen plant/hydrogen	MiE → F	–	2		MHIDAS, 2009
150.	1997	Burnside, USA	Grain dryer/LPG	F → BLEVE	2	2		Abbasi and Abbasi, 2007a
151.	1997	Visakhapatnam, India	HPCL refinery/LPG	Tank F → MaE → MaE and Fs	60		\$20 Million damage	Khan & Abbasi, 1999a, 1999b
152.	1997	Magdalla, India	Transportation/ ethylene chloride and sulphur	F → major F	–	–		MHIDAS, 2009
153.	1997	Zamboanga, Philippines	Transportation/ hydrocarbons	F → MiE → Fs	1	6		MHIDAS, 2009
154.	1998	Albert City, USA	Turkey farm/propane	Vehicle struck pipeline → F → BLEVE	2	7		Wolf, 2006
155.	1998	Longford Victoria, Australia	Gas processing plant/ heat exchanger/ hydrocarbon	VCE → major F	2	8		The 100 Largest Losses, 2003
156.	1999	Laem Chabang, Thailand	Refinery/tank farm/gasoline	Tank overfilling → VCE → F	7	18	4000 Residents had to be evacuated	PressTV, 2009

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
157.	2000	Mexico City, Mexico	Gas plant/natural gas	F → series of explosions	22			Independent, 2009
158.	2000	Gloucester, UK	Waste transfer station	F → MaEs		9		Environment-Agency, 2009
159.	2000	Douglas, USA	Oil field service company/propane	Propane leak → series of explosions (a tank BLEVEs)				Fireworld, 2009
160.	2000	Texas, USA	Tanker truck/propane	MiE → MaE	2	1	Evacuated 200 residents	Acusafe, 2009
161.	2000	Ontario, USA	Water treatment plant/corrosive gases	F → series of explosions			Several nearby companies were evacuated	Acusafe, 2009
162.	2001	Ohio, USA	Chemical plant	Chemicals overheated → series of explosions	–	17		Acusafe, 2009
163.	2001	Pennsylvania, USA	Dynamite plant/dynamite and fireworks	MaE → MaEs	1	3	200 Residents evacuated	Acusafe, 2009
164.	2001	Louisiana, USA	Refinery/turbine fuel	Leak → explosion → F	–	2		Acusafe, 2009
165.	2001	Roncador, Brazil	Offshore platform/drain tank/mixture of water and hydrocarbons	E → E and platform flooding	10	–	USD 515,000,000 damage	The 100 Largest Losses, 2003
166.	2001	Nevada, USA	Chemical plant	F → a series of explosions	–	5		Acusafe, 2009
167.	2001	Michigan, USA	Pressed board manufacturing plant/wood chips	F → MaE	–	9		Acusafe, 2009
168.	2001	Gastonia, USA	Electroplating complex	F → series of explosions	–	–	\$ 1 Million damages	Acusafe, 2009
169.	2001	Delaware, USA	Refinery/sulfuric acid	F → acid spill → releasing a cloud of toxic gas	1	8		Acusafe, 2009
170.	2001	Pennsylvania, USA	Dynamite and fireworks plant	MaE → series of explosions	1	3	200 People evacuated	NYtimes, 2009
171.	2001	Dayton, USA	Chemical & polymer company	Refrigeration system failed → overheating of chemicals → series of explosions				Acusafe, 2009
172.	2001	Toulouse, France	Petrochemical plant/ammonium nitrate warehouse	MaE → MaE	30	More than 5000	€ 2.3 Billion	UNEP, 2009
173.	2001	Conocophillips, Humber Refinery, UK	Refinery/deethanizer overhead pipe/mixture of ethane, propane, butane	Pipe rupture and hydrocarbon release → VC → other pipe ruptures → fireball	0			HSE, 2009
174.	2001	Rio de Janeiro offshore, Brazil	Oil platform/HCS	Tank rupture due to overpressure → damage to various equipment → gas dispersion → F → MaE	12		The platform sank into the water	Petrobras, 2001; EPA, 2001
175.	2001	Mexico City, Mexico	Dye factory/alcohol and methanol	F → MAEs	–	17	More than 5000 people evacuated	Acusafe, 2009
176.	2002	Mississippi, USA	Rubber plant/dryer/powdered rubber	F → MaE	4	8		Acusafe, 2009

(continued on next page)

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
177.	2002	Kuwait	Oil producing plant/ crude oil	Leak → MaE → F	4	–		Acusafe, 2009
178.	2002	Austin, USA	Food processing plant	MiEs → MaE		5		Fireworld, 2009
179.	2003	Perm Region, Russia	Rail tank car/ propane–butane blend	MaE → series of explosions	1			Pravda, 2009
180.	2004	Skikda, Algeria	LNG plant/boiler	VC → MiE → MaE	27	74	7 People missing, nearby electricity generation plant & oil refinery shutdown	Bape, 2009
181.	2004	Chongqing, China	Chemical plant/ chlorine	Chlorine gas leak → MaEs → chlorine dispersion	9	3	150000 people evacuated	Chinadaily, 2009
182.	2004	Vadodra, India	Oil refinery/ slurry reactor	MaE → F	2	16		Thehindu- businessline, 2009
183.	2004	Zahedan, Iran	Truck/gasoline	Truck lost control hit a bus → F → other lorry fire	90	114		UNEP, 2009
184.	2004	Neyshabur, Iran	Rail tank car/variety of chemicals: sulphur, gasoline, fertilizers, cotton wool	Tank derailment → F → MaE	328	460		BBC, 2009; UNEP, 2009
185.	2005	Texas City, USA	BP refinery/ isomerization unit/hydrocarbons	VC → MaE → Fs	15	180	More than 1 billion dollar damage	Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2007
186.	2005	Buncefield, UK	Oil storage terminal/ motor fuel	Tank overfilling → VC → MaE → F	0	60		HSE, 2009
187.	2005	St. Louis, USA	Gas repacking & distribution facility/ propylene	F → MaE s and Fs	1			Chemsafety, 2009
188.	2005	Fort Worth, USA	Solvent & other chemicals	F → MiE → other fires	0	4		Infowars, 2009
189.	2007	Valero McKee Refinery, USA	Refinery/propane deasphalting unit/propane	Propane leak → F → pipe rack collapse → other pipe rupture and chlorine release				CSB, 2009
190.	2008	Shazand, Iran	Chemical plant/2-ethyle hexanol	MaE → MaEs → F	30	38	90% Plant destroyed, up to 300 m glasses were shattered	BBC, 2009
191.	2008	Maricopa, USA	Grain silo/grain	MaE → MaE	–	3		Maricopa360, 2009
192.	2008	Nagothane, India	Polymer plant/LLDPE unit/ cyclone filter	MiE → MaE	4	46		Hindustantimes, 2009
193.	2008	Yizhou City, China	Polyvinyl acetate & other chemicals	F → Es → Fs	16	57	11,500 people evacuated	Topnews, 2009
194.	2008	Lalbagh, Bangladesh	Polymer	F → Fs	6	6	Fifty houses gutted	Ittefaq, 2009
195.	2008	San Antonio, USA	Atlas pallet	F → MaE → F	–	–	–	Ksat, 2009
196.	2008	Torkham, Pakistan	Oil tankers	MaE → MaE → Fs → MaE	–	60	Forty oil tankers destroyed	Kbri, 2009

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
197.	2008	Toronto, Canada	Sunrise propane industrial gases	MaE → MaE → F	2	54	Evacuation of an area of 1.6 km radius; clean up costs \$ 1.5 million	MHIDAS, 2009
198.	2009	Sao Paulo, Brazil	Chemical depot	F → MaEs → F	–	10	'Dozens evacuated'; major property loss	Dailymail, 2009
199.	2009	Yerevan, Armenia	Synthetic rubber factory	F → MaE → MaE → F	3	24	One person unaccounted; massive property damage	Asbarez, 2009
200.	2009	Ambegaon, India	Chemical plant	F → MaEs	–	1		Saunalahti, 2009
201.	2009	Badami Bagh, Pakistan	Chemical depot/sulphur, sulfuric acid, potassium permanganate, and industrial and textile chemicals	F → several Fs and MaEs	>12		Severe damage to neighboring houses and facilities	Saunalahti, 2009
202.	2009	Delhi, India	Paint factory	E → F	1	12	Fire spread to the nearby buildings causing heavy damage	Thaindian, 2009
203.	2009	Delhi, India	Chemical factory	E → F	2			Thaindian, 2009
204.	2009	Faridabad, India	Footwear industry/ material involved was a highly flammable mixture of chemicals used for making shoes and rubber	E → F	10		5 More people missing	Thaindian, 2009
205.	2009	Himachal Pradesh, India	Air-conditioning manufacturing company	F → E check	8	19		Thaindian, 2009
206.	2009	Punjab, India	Fertilizer factory	F → MiE		2	Losses incurred due to the accident is estimated to be between Rs 80 and 100 million	Thaindian, 2009
207.	2009	Madhya Pradesh, India	Ideal Explosives Limited and Rajasthan Explosives Pvt. Ltd.	MaE → caused MaE in nearby plant	10	>100	The explosions caused damage to at least 15 nearby plants	Thaindian, 2009
208.	2009	West Carrollton, USA	Veolia Environmental Sciences	Leak → E → F	–	2	20 Residences damaged	Chemsafety, 2009
209.	2009	Viareggio, Italy	Freight train/LPG	MaE → 2MaEs → F	15	>50	1000 Residents evacuated, over 100 rendered homeless	Reuters, 2009
210.	2009	Dunkirk, France	Refinery	E → F	1	5	14 People shocked by the incident needed psychiatric support.	Safetynews, 2009
211.	2009	Hyderabad, India	Chemical solvent extraction factory	E → F → leak	2	2		Hindu, 2009
212.	2009	Molo, Kenya	Gasoline tanker	Tanker overturned → Leak → fireball	111	>200		Firegeezzer, 2009

(continued on next page)

Annexe V : Base de données des accidents à effets dominos

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
213.	2009	Hyderabad India	Drug intermediates manufacturing company:	MaE → F	–	2	Shockwaves due to the explosion were felt even 10 km away.	Deccanchronicle, 2009
214.	2009	Saravli, India	Chemical dyeing plant	E → F	2	4		Saunalahti, 2009
215.	2009	Karachi, Pakistan	Chipboard making factory	E → F	3	5		Dailytimes, 2009
216.	2009	Pawane, India	Darshan Chemicals	F → Fs → Es	2	9		Saunalahti, 2009
217.	2009	Columbus, US	Columbus chemical industries	F → Es	–	3		Wkowntv, 2009
218.	2009	La Mesa, US	Saltwater disposal factory	Lightning bolt → F → Fs → E	–	1		Whdh, 2009
219.	2009	Okhla, India	Foam manufacturing factory	F → Fs → E	1	8	The entire factory was destroyed	Tribuneindia, 2009
220.	2009	Gazipur Bangladesh	Blade making factory/LPG	E → Fs	3	15		TheDailyStar, 2009
221.	2009	Agra, India	Firecracker Godown in a commercial complex	F → MiEs → F	–	–	The fire spread to nearby shops, gutting some of them	Taragana, 2009
222.	2009	Yanshi City, China	Luoran Co. Ltd/chemical dye production	F → E → Fs	5	>108	Residents within a 1 km radius were evacuated	Xinhuanet, 2009
223.	2009	Ulyanovsk, Russia	Army depot/ammunition	E → MaEs and Fs	2	More than 10	3000 People were evacuated	BBC, 2009
224.	2009	Jaipur, India	Petroleum products	F → VCE → several pool fires with explosions	13	>200	500,000 Evacuated; property loss worth \$40 million	PressTV, 2009