

Projet : **DAEU LHYFE BESSIERES**

Titre de la pièce : **PJ n°49 – Etude de Dangers – site Lhyfe de Bessières**



<i>Lhyfe</i>	Projet	Numéro de document			Version
	DAEU	PJ 49			Finale
	Historique de relecture				
	Date	Statut	Rédacteur	Contrôleur	Approbateur
	24/10/2024	Approuvé	S. GRAOUNA 	L. GRAS 	M. ROUSSET <i>Lhyfe</i>
18/12/2024	Approuvé	M. ROUSSET <i>Lhyfe</i>	S. LACOMBE <i>Lhyfe</i>	A. HAMON <i>Lhyfe</i>	

Table des matières

1	PREAMBULE	7
2	DESCRIPTION DE LHYFE	8
2.1	La société Lhyfe.....	8
2.2	Aspects administratifs.....	8
2.3	Règlementation applicable	8
2.3.1	Règlementation ICPE	8
2.3.2	Loi sur l'eau.....	9
2.4	Description générale du site de Bessières	9
2.4.1	Effectifs	9
2.4.2	Horaires	10
2.5	Gestion de l'environnement et de la sécurité sur le site	10
2.5.1	Protection du site	10
2.5.2	Accueil du personnel	10
2.5.3	Entreprises extérieures.....	11
2.5.4	Maîtrise d'exploitation	11
2.5.5	Formation du personnel	11
2.5.6	Protection incendie.....	12
2.5.7	Organisation de l'intervention.....	12
3	DESCRIPTION DES INSTALLATIONS.....	14
3.1	Implantation et accès.....	14
3.2	Installations du site	16
3.2.1	Zone de production	16
3.2.2	Zone de chargement des tube trailers / CGEM d'hydrogène.....	18
3.2.3	Utilités.....	18
3.2.4	Zone de rétention des eaux.....	19
3.3	Organisation de l'exploitation	19
4	DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DU VOISINAGE	20
4.1	Situation géographique.....	20
4.2	Présentation de l'environnement naturel	20
4.2.1	Climatologie	20
4.2.2	Hydrographie	21
5	IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS	23
5.1	Introduction	23
5.2	Identification des dangers intrinsèques aux produits mis en œuvre	23
5.2.1	Produits dangereux et propriétés.....	23
5.2.2	Déchets produits par le site.....	25
5.2.3	Risques d'incompatibilité	25
5.3	Identification des dangers liés à l'installation.....	25
5.4	Identification des dangers liés aux phases d'arrêt ou transitoire.....	25
5.5	Identification des dangers liés à la perte d'utilités	26
5.6	Identification des dangers liés à l'environnement naturel	26
5.6.1	Foudre.....	26
5.6.2	Inondation	26
5.6.3	Séisme.....	27
5.6.4	Climatologie	27
5.7	Risques d'origine anthropique.....	27
5.7.1	Réseau routier	27
5.7.2	Réseau ferroviaire.....	28
5.7.3	Chute d'un aéronef.....	28
5.7.4	Intrusion - Malveillance	28

5.7.5	Facteur humain.....	29
5.7.6	Installations industrielles extérieures à l'établissement	29
5.8	Conclusion.....	30
6	RETOUR D'EXPERIENCE ET ENSEIGNEMENTS.....	31
6.1	Préambule.....	31
6.2	Accidentologie interne.....	31
6.3	Accidentologie externe	32
6.4	Conclusion.....	35
7	REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS.....	36
7.1	Principe de substitution	36
7.2	Principe d'intensification	36
7.3	Principe d'atténuation	36
7.4	Mesures de prévention et protection mises en œuvre sur le site.....	37
8	EVALUATION PRELIMINAIRE DES RISQUES.....	38
8.1	Rappel de la démarche	38
8.2	Evaluation Préliminaire des Risques liés aux installations.....	39
8.2.1	Découpage fonctionnel.....	39
8.2.2	Analyse Préliminaire des risques (APR)	41
8.2.3	Scénarios sélectionnés pour l'ADR	51
9	ANALYSE DETAILLEE DES RISQUES	52
9.1	Préambule.....	52
9.2	Méthodologie de l'analyse probabiliste	52
9.2.1	Fréquence des pertes de confinement.....	53
9.2.2	Probabilité d'inflammation.....	53
9.3	Etude des conséquences.....	55
9.3.1	Types d'effets à considérer.....	55
9.3.2	Présentation du logiciel PHAST.....	55
9.3.3	Evaluation du Terme Source.....	56
9.3.4	Dispersion atmosphérique	56
9.3.5	Phénomène de Flash-Fire	57
9.3.6	Phénomène d'UVCE.....	58
9.3.7	Phénomène de Jet Enflammé.....	60
9.3.8	Phénomène d'éclatement de capacité.....	61
9.3.9	Phénomène d'explosion confinée	61
9.3.10	Conditions météorologiques	62
9.3.11	Enjeux externes à proximité du site	62
9.4	Analyse détaillée des risques des scénarios retenus.....	65
9.4.1	ER 1 : Eclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur	65
9.4.2	ER 2 : Fuite d'H ₂ dans le conteneur de l'électrolyseur	68
9.4.3	ER 3 : Fuite ou rupture sur circuit H ₂ en sortie de l'électrolyseur (hors container)	72
9.4.4	ER 4 : Fuite d'H ₂ dans le conteneur des compresseurs.....	83
9.4.5	ER 5 : Fuite sur circuit H ₂ rack au refoulement des compresseurs	87
9.4.6	ER 6 : Fuite ou rupture sur circuit H ₂ au refoulement des compresseurs	95
9.4.7	ER 7 : Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène.....	104
9.4.8	ER 8 : Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres.....	108
9.4.9	ER 9 : Eclatement d'une bouteille de stockage d'H ₂	112
9.4.10	ER 10 : Eclatement d'un cylindre de la capacité tampon à haute pression	116
9.5	Récapitulatif de l'ensemble des mesures de maîtrise des risques (MMR).....	118
9.6	Justification de la cotation des MMR.....	119
9.6.1	MMR passive	119
9.6.2	MMR actives	119
9.7	Bilan de l'analyse détaillée des risques.....	125

9.8	Matrice des risques majeurs.....	126
9.9	Justification de la démarche MMR	127
10	EFFETS DOMINOS ET INTERACTIONS.....	128
10.1	Définition de l'effet domino.....	128
10.2	Effets dominos externes	128
10.2.1	Interactions de l'installation Lhyfe sur son environnement industriel.....	128
10.2.2	Interactions des bâtiments voisins sur les installations du site.....	128
10.3	Effets dominos internes	130
10.3.1	Etude selon la gravité	130
10.3.2	Etude selon la probabilité.....	135
10.4	Conclusion sur l'analyse des effets dominos	136
11	CONCLUSION	137

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1. Implantation du site Lhyfe de Bessières	14
Figure 2. Plan de masse du site Lhyfe de Bessières - Echelle 1:400	15
Figure 3. Schéma bloc du procédé de fabrication du site de Bessières	16
Figure 4. Principe de fonctionnement de la pile PEM	17
Figure 5. Implantation du site LHYFE de Bessières.....	20
Figure 6. Localisation des cours d'eau à proximité du projet (Source : Géoportail).....	22
Figure 7. Zonage PPRI Tarn (Source : Georisques).....	22
Figure 8. Diagramme des types de phénomènes dangereux issus de l'accidentologie externe	32
Figure 9. Plan zonage ATEX site Lhyfe Bessières.....	54
Figure 10. Schéma de principe des différentes phases de la dispersion atmosphérique d'un nuage inflammable n'impactant pas le sol.....	57
Figure 11. Enjeux à proximité du site	63
Figure 12. Noeud papillon ER 1 - Explosion séparateur anode	67
Figure 13. Noeud papillon ER 2- Fuite d'H2 dans le conteneur de l'électrolyseur	70
Figure 14. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3A – Phase 1	73
Figure 15. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3A – Phase 2	74
Figure 16. Noeud papillon ER 3 - Fuite sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur (hors conteneur)	76
Figure 17. Représentation du nuage d'hydrogène maximal à la LIE pour l'ER 3B - Phase 1.....	79
Figure 18. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3B - Phase 2	79
Figure 19. Nœud papillon ER 3B- Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur (hors conteneur)	81
Figure 20. Nœud papillon ER 4 - Fuite d'H2 dans le conteneur des compresseurs.....	85
Figure 21. Extrait de la maquette 3D orientée vers les canalisations d'hydrogène haute pression du site	87
Figure 22. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 5A – Phase 2	90
Figure 23. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 5B.....	91
Figure 24. Noeud papillon ER 5A – Rupture de ligne sur circuit H2 rack au refoulement des compresseurs	93
Figure 25. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6A - Phase 1	96
Figure 26. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6A – Phase 2	97
Figure 27. Noeud papillon ER 6A - Petite fuite sur circuit H2 au refoulement des compresseurs	98
Figure 28. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6B - Phase 1	100
Figure 29. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6B – Phase 2	100
Figure 30. Noeud papillon ER 6B – Rupture de ligne sur circuit H2 au refoulement des compresseurs	102
Figure 31. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 7	105
Figure 32. Noeud papillon ER 7 - Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène	107
Figure 33. Noeud papillon ER 8 - Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres	110

Tableaux

Tableau 1. Identification administrative du site Lhyfe Bessières.....	8
Tableau 2. Rubrique de la nomenclature ICPE identifiée pour le site de Bessières	8
Tableau 3. Classement du site au titre de la loi sur l'eau	9
Tableau 4. Zone d'implantation des détecteurs d'incendie	12
Tableau 5. Données climatiques station Lavour (1991 - 2020) - SOURCE METEO France	21
Tableau 6. Produits dangereux présents sur le site Lhyfe de Bessières	24
Tableau 7. Identification des potentiels de dangers liés à l'installation	25
Tableau 8. Accidentologie externe	34
Tableau 9. Echelle de gravité simplifiée.....	38

Tableau 10. Sections étudiées	40
Tableau 11. Analyse préliminaire des risques	50
Tableau 12. Liste des ERC à étudier en détail	51
Tableau 13. Fréquences d'occurrence de fuite sur équipements (base de données HYRAM).....	53
Tableau 14. Probabilités d'inflammation retenues dans le cadre de l'étude	53
Tableau 15. Annexe 1 de l'Arrêté du 29 septembre 2005	55
Tableau 16. Critères de choix de l'indice Muti-Energie selon Kinsella	60
Tableau 17. Conditions météorologiques standards utilisées	62
Tableau 18. Distances d'effets de surpression ER 1.....	65
Tableau 19. Distances d'effets de surpression ER 2.....	68
Tableau 20. Données d'entrée ER 3.....	72
Tableau 21. Données d'entrée ER 3 A.....	72
Tableau 22. Enjeux impactés par les effets de l'ER 3A.....	74
Tableau 23. Données d'entrée ER 3 B.....	78
Tableau 24. Enjeux impactés par les effets de l'ER 3B.....	80
Tableau 25. Distances d'effets de surpression ER 4.....	83
Tableau 26. Données d'entrée ER 5.....	88
Tableau 27. Données d'entrée ER 5A	89
Tableau 28. Données d'entrée ER 5B.....	90
Tableau 29. Enjeux impactés par les effets de l'ER 5B.....	92
Tableau 30. Données d'entrée ER 6.....	95
Tableau 31. Données d'entrée ER 6A	95
Tableau 32. Données d'entrée ER 6B.....	99
Tableau 33. Données d'entrée ER 7.....	104
Tableau 34. Données d'entrée ER 8.....	108
Tableau 35. Données d'entrée ER 10.....	116
Tableau 36. Tableau récapitulatif des MMR	119
Tableau 37. Justification du niveau de confiance associé aux MMR actives	123
Tableau 38. Récapitulatif des MMR actives et du niveau de confiance associé.....	124
Tableau 39. Tableau de synthèse des ER	125
Tableau 40. Matrice des risques majeurs du site	126

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Hynam+ Version 5.0 Technical Reference Manual – Sandia report SAND2022-16425 Printed November 2022 - extrait

Annexe 2 – Déclaration de conformité de l'électrolyseur

Annexe 3 – Cartographie des effets thermiques et de surpression

1 PREAMBULE

Le présent document s'inscrit dans le cadre du dossier de Demande d'Autorisation Environnementale Unique (DAEU) déposé par la société LHYFE pour son site existant de Bessières (31).

Il constitue le volet « Etude De Dangers » du dossier, qui a pour objectif de définir les dangers puis d'analyser les risques liés à l'activité et aux installations du site en termes de sécurité des personnes, de l'environnement et des biens en cas de situation accidentelle.

Pour cela, il s'agit :

- De présenter le site et les installations étudiés ;
- De réaliser un état des lieux exhaustif de l'environnement naturel et humain ;
- D'identifier les risques liés aux produits, au procédé et à l'environnement de l'unité ;
- D'analyser les conséquences des scénarios d'accidents potentiels ;
- De décrire les moyens techniques et humains de prévention des risques mis en œuvre dans le cadre de l'exploitation du site.

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de l'Etude De Dangers s'articule autour de trois étapes principales :

- L'Identification Des Dangers (IDD) liés aux produits utilisés, aux procédés mis en œuvre et présentés par l'environnement des installations étudiées. Cette partie permet de recenser les risques liés au fonctionnement des installations et les scénarios d'accidents pouvant en découler ;
- L'Évaluation Préliminaire des Risques (EPR), menée grâce à une revue d'analyse de risques basée sur :
 - L'expérience du procédé ;
 - La connaissance de l'exploitation des installations étudiées ;
 - L'historique des accidents ;
 - Les règles de l'art en matière de conception, de construction et de suivi des équipements.
- L'Analyse Détaillée des Risques (ADR), correspondant à l'étude quantitative des scénarios d'accidents retenus suite à l'EPR, de façon à évaluer leurs conséquences s'ils survenaient malgré toutes les mesures de prévention, de protection et de mitigation mises en œuvre.

La documentation consultée pour la réalisation de cette étude s'appuie en particulier sur :

- L'examen des Fiches de Données de Sécurité (FDS) des produits, la configuration des installations, les notices techniques des différents équipements ;
- Les plans et schéma des installations ;
- L'analyse du retour d'expérience des accidents déjà survenus sur des installations similaires, et des enseignements qui en ont été tirés.

2 DESCRIPTION DE LHYFE

2.1 La société Lhyfe

La société Lhyfe est un groupe européen fondé en France en 2017. Elle est spécialisée dans la production d'hydrogène dit « hydrogène renouvelable », c'est-à-dire fabriqué à partir d'énergie renouvelable telle que l'énergie éolienne.

Lhyfe dispose de trois sites terrestres de production d'hydrogène en France. Ils sont implantés dans les Pays de la Loire (Bouin, Vendée), en Bretagne (Buléon, Morbihan) et en Occitanie (Bessières, Haute-Garonne), objet de la présente étude. A ce titre, Lhyfe est un acteur majeur sur le marché européen de l'hydrogène vert.

2.2 Aspects administratifs

Forme juridique :	SAS
Raison sociale :	Lhyfe Bessières
Adresse du siège social :	Lhyfe 1ter Mail Pablo Picasso 44000 Nantes
RCS :	Nantes B 850 415 290
SIREN :	850415290
SIRET :	91 326 850 400 028
N° code APE :	7112B (Ingénierie, études techniques), 2011Z (Fabrication de gaz industriels)
Activité principale :	Production d'hydrogène à l'aide d'énergie renouvelable
Direction du site :	Antoine Hamon, directeur des opérations
Personnes en charge du dossier :	Adrien Chazelas
Contact :	Adrien.chazelas@lhyfe.com

Tableau 1. Identification administrative du site Lhyfe Bessières

2.3 Règlementation applicable

2.3.1 Règlementation ICPE

Le projet d'augmentation de capacité de stockage est concerné par la rubrique de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement suivante :

Rubrique	Nature des activités	Seuil atteint suite au projet	Régime
4715	Hydrogène (numéro CAS 133-74-0) La quantité susceptible d'être présente dans l'installation étant : Supérieure ou égale à 1 t (A) Supérieure ou égale à 100 kg mais inférieure à 1 t (DC) <i>Quantité seuil bas au sens de l'article R. 511-10 : 5 t.</i> <i>Quantité seuil haut au sens de l'article R. 511-10 : 50 t.</i>	Capacité de stockage maximum : 4,9 tonnes	A

Tableau 2. Rubrique de la nomenclature ICPE identifiée pour le site de Bessières

Le site n'est pas classé au titre de la directive SEVESO.

L'augmentation de la capacité de stockage d'hydrogène sur site conduit à une évolution du classement ICPE de l'installation, en passant du régime de Déclaration à celui d'Autorisation au regard de la rubrique 4715.

2.3.2 Loi sur l'eau

Le site Lhyfe de Bessières est classé à Déclaration au titre de la Loi sur l'eau.

En effet, l'exploitation est concernée par les rubriques suivantes :

Rubrique	Intitulé	Régime
1.1.1.0	Sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau : (D) projet soumis à Déclaration.	Site soumis à Déclaration
1.3.1.0	A l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L214-9, ouvrages, installations, travaux permettant un prélèvement total d'eau dans une zone où des mesures permanentes de répartition quantitative instituées (*), notamment au titre de l'article L211-2, ont prévu l'abaissement des seuils : 1° Capacité supérieure ou égale à 8 m ³ /h : (A) projet soumis à Autorisation 2° Dans les autres cas : (D) projet soumis à Déclaration.	Le site prélève un débit de 1,2 m ³ / h. Le site est soumis à Déclaration

Tableau 3. Classement du site au titre de la loi sur l'eau

2.4 Description générale du site de Bessières

Le site Lhyfe de Bessières s'étend sur une surface de 7 727 m².

Construit pour un démarrage de la production au premier semestre 2024, les installations sont récentes.

Le site est organisé en trois zones distinctes : une zone d'accueil et de contrôle, une zone de production et une zone de manœuvre et de remplissage des tube trailers utilisés pour le transport de l'hydrogène.

2.4.1 Effectifs

Le site fonctionne dans un premier temps avec deux employés, un responsable d'exploitation et un technicien d'exploitation. Pendant le temps de présence du personnel d'exploitation sur site, l'exploitation se fait sous la surveillance directe de celui-ci.

A terme, l'opération du site pourra être gérée via une supervision à distance, un opérateur supervisera alors le site à tout moment via la communication entre le site et le centre d'opération à distance, au même titre qu'un opérateur sur site dans la salle de contrôle.

En dehors des périodes où l'opération du site est surveillée directement par un ou des opérateurs, un système d'astreinte est mis en place. Le principal objectif de l'astreinte sur les sites de production est de préserver la sécurité des personnes, de l'environnement et des biens, cependant les installations de production sont conçues pour être sûres sans intervention humaine dans quelque situation que ce soit. L'astreinte n'a pas pour but d'effectuer des travaux planifiés ou des réparations majeures.

L'astreinte technique est informée en temps réel par téléphone en cas d'événement imprévu et il lui incombe de réagir correctement afin de maintenir le niveau de sécurité visé et, si possible, de respecter le plan de production.

En cas de problème majeur, le responsable de la cellule de crise au sein de Lhyfe est informé par l'astreinte technique et établit avec lui le plan d'action conformément à la procédure d'urgence de Lhyfe.

2.4.2 Horaires

Le site fonctionne de manière autonome 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Les horaires d'ouverture du site sont, du lundi au vendredi :

- Matin: 9h00 à 12h00,
- Après-midi: 14h00 à 17h00,

2.5 Gestion de l'environnement et de la sécurité sur le site

2.5.1 Protection du site

Le périmètre du site de Lhyfe Bessières est clôturé par des grillages rigides d'environ 2 m de hauteur.

Le stockage d'hydrogène sont des zones sécurisées maintenues fermées et à accès restreint (utilisation de badges).

Il est prévu à terme que la zone de chargement de tube trailers soit accessible 24h/24 par les chauffeurs, munis de badge et formés, pour procéder au chargement de citernes.

Le site fait l'objet d'une vidéo-surveillance, en lien avec une société de gardiennage externe. En cas d'intrusion détectée, une ronde de contrôle peut être déclenchée si une levée de doute est nécessaire, pouvant donner lieu à une demande d'intervention auprès de la gendarmerie.

2.5.2 Accueil du personnel

Le personnel arrivant sur site participe à un accueil sécurité en ligne ou dispensé par le Responsable de site ou son adjoint. L'objectif de cette présentation est d'informer les collaborateurs des règles et de la politique HSE de Lhyfe, de présenter l'organisation managériale et surtout de les renseigner sur les règles et les risques du site.

Le site ayant pour objectif de fonctionner de manière autonome, les interventions sur site seront limitées.

2.5.3 Entreprises extérieures

Lhyfe s'assure que les entreprises extérieures intervenant sur site se conforment aux règles de sécurité définies par Lhyfe. Pour ce faire, Lhyfe vérifie avec les entreprises et leurs sous-traitants :

- L'analyse des risques généraux et spécifiques (aux différents postes),
- Les procédures de sécurité,
- La documentation sécurité,
- Les formations et habilitations.

puis établit avec l'entreprise extérieure un Plan de Prévention pour les travaux qui le nécessitent.

En plus de cette vérification documentaire, Lhyfe réalise des audits sur le personnel du sous-traitant afin de vérifier le respect des règles sécurité, et les équipements et mesures mis en place pour la protection de l'environnement.

2.5.4 Maîtrise d'exploitation

La société Lhyfe dispose de documents internes définissant les axes majeurs de gestion des risques de l'entreprise :

- DUERP,
- Système de Management des Risques,
- Manuel HSE spécifique aux sites de Lhyfe.

Des mesures adaptées sont prévues dans le manuel HSE du site afin de concrétiser cette volonté de maîtrise de l'exploitation par Lhyfe.

2.5.5 Formation du personnel

Le personnel Lhyfe présent sur site suit des formations spécifiques, en majorité via des organismes externes spécialisés :

- Risque électrique et opérations électriques,
- ATEX niveaux 0, 1 et 2,
- Equipements Sous Pression,
- Chargé de consignation,
- Sauveteur Secouriste du Travail.

Ces formations sont renouvelées périodiquement selon la réglementation en vigueur.

En plus de ces formations reconnues, des réunions de sécurité sont organisées pour améliorer la performance HSE et promouvoir la culture sécurité auprès du personnel.

2.5.6 Protection incendie

Les différents aspects relatifs à la protection contre l’incendie sont détaillés ci-dessous.

- Détection automatique et alarme

Le site est équipé de détecteurs d’incendie implantés dans les zones suivantes :

Zone	Nombre de détecteurs d’incendie
Salle de contrôle	1
Bâtiment de réception	4
Conteneur électrique	2
Electrolyseur	2 dans la partie électrolyseur 2 dans la partie traitement de l’eau/utilités 3 dans la partie transformation électrique
Conteneurs des compresseurs	1 dans la partie compresseur 1 dans la partie contrôle
Loges de chargement	1 détecteur de flamme adapté à l’hydrogène par loge de chargement

Tableau 4. Zone d’implantation des détecteurs d’incendie

En cas d’activation de ces détecteurs, le site est mis à l’arrêt automatiquement et des signaux lumineux et sonores d’alerte sont activés.

- Poteau incendie

Un poteau incendie alimenté par le réseau public d’eau incendie est implanté sur site pour permettre aux services de secours d’intervenir si besoin. Une zone matérialisée au sol est disponible pour les sapeurs-pompiers qui seraient amenés à intervenir sur site.

- Extincteurs et RIA

Le site est équipé de deux Robinets d’Incendie Armés (RIA), implantés de chaque côté des loges de chargement d’hydrogène. Ils sont alimentés par le réseau public d’eau.

Par ailleurs, plusieurs extincteurs sont répartis sur le site, dont 1 extincteur à poudre de 50kg sur roues.

De plus, chaque ensemble camion et remorque possède un minimum de 2 extincteurs (en interne et en externe de la cabine), représentant au moins 12 kg de poudre ABC.

- Collecte des eaux d’extinction incendie

Le site dispose d’un bassin aérien étanche de rétention des eaux d’incendie d’une capacité maximale de 160 m³. En cas d’incendie, le bassin sera isolé du milieu naturel afin d’éviter la pollution de ce dernier.

Le bassin est implanté à l’extrémité nord-est du site.

2.5.7 Organisation de l’intervention

Lhyfe dispose d’un numéro d’urgence centralisé, renvoyant 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 vers un agent capable de faire appel aux services ou personnes identifiées selon la situation.

Lorsque cela est nécessaire, le site déclenche le plan d'urgence. Il détaille la procédure d'intervention et la responsabilité de chacun en cas d'accident.

Par ailleurs, Lhyfe dispose d'une procédure d'intervention en cas d'incendie sur les containers d'H2 et les camions. Cette procédure inclut tout incident se déroulant sur les routes sur lesquelles circulent les marchandises produites par Lhyfe. Par conséquent, les chauffeurs sont formés aux consignes de Lhyfe et à la manipulation d'extincteurs.

3 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS

3.1 Implantation et accès

Le site Lhyfe Bessières est implanté à l’ouest du centre-bourg de la commune de Bessières (31), en Haute-Garonne.

Le site est localisé dans la zone d’activité du Triangle, dans le lieu-dit « les Prioux », au 372 chemin des Prieurs, 31160 Bessières.

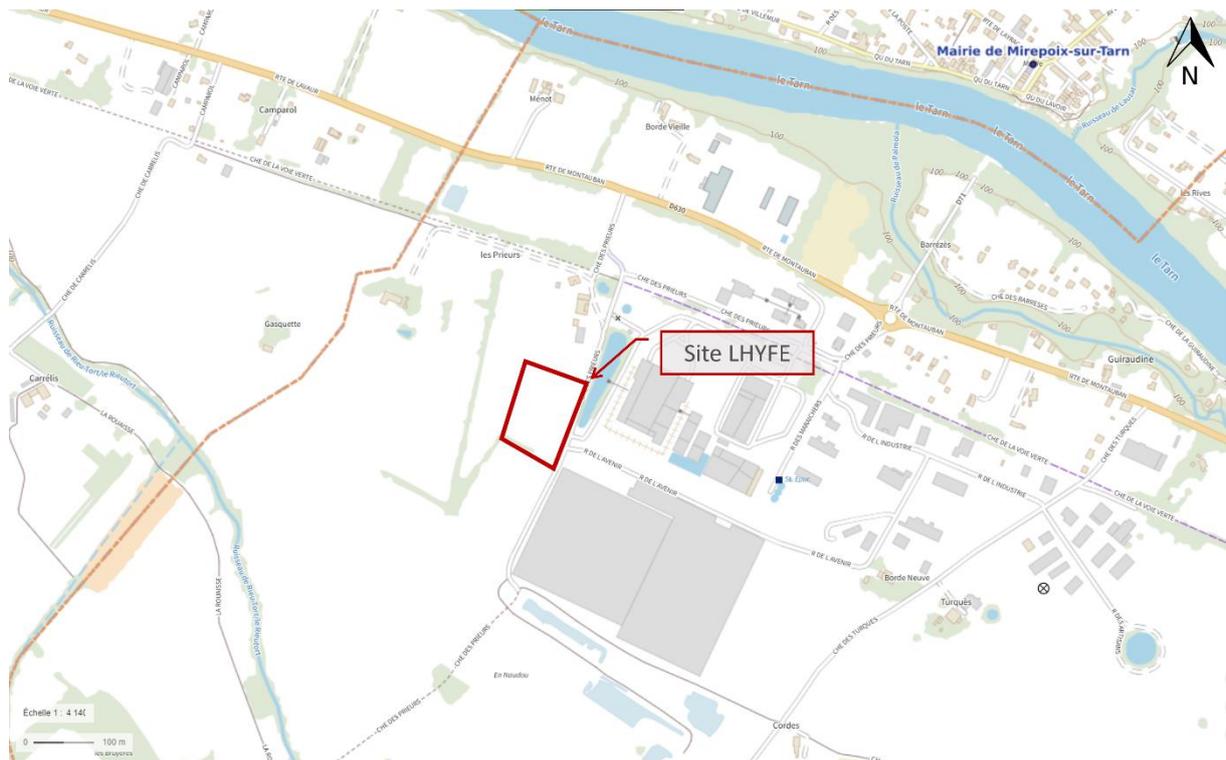


Figure 1. Implantation du site Lhyfe de Bessières

L’accès principal au site se fait par le chemin de Campayré aux Prioux, desservi par la route départementale D630.

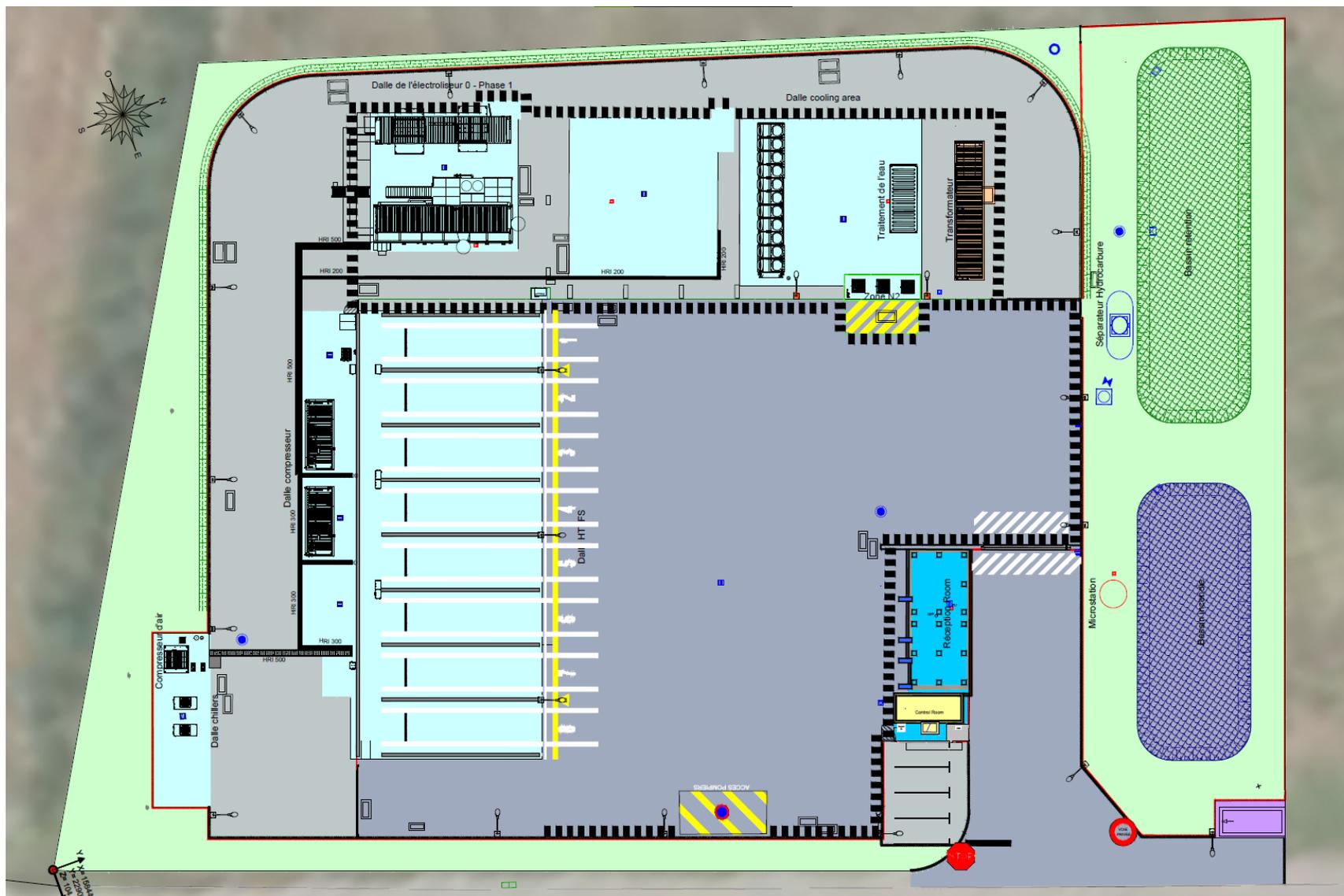


Figure 2. Plan de masse du site Lhyfe de Bessières - Echelle 1:400

Une zone de stationnement interne est aménagée, à l'entrée du site, pour les véhicules du personnel qui sera amenée à intervenir sur le site.

Une zone de manœuvre est aménagée sur le site afin que les tube trailers puissent rejoindre les loges de chargement d'hydrogène.

Le site est par ailleurs conçu pour que toutes les zones soient accessibles pour les véhicules de secours.

3.2 Installations du site

Le site est organisé en trois zones : la zone de production et utilité, la zone de stockage et de distribution et la zone de rétention des eaux. Ces dernières sont présentées ci-dessous.

3.2.1 Zone de production

La zone de production est localisée au sud et à l'est du site. Le procédé de fabrication d'hydrogène mis en œuvre consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau ; les étapes de production d'hydrogène sont les suivantes :

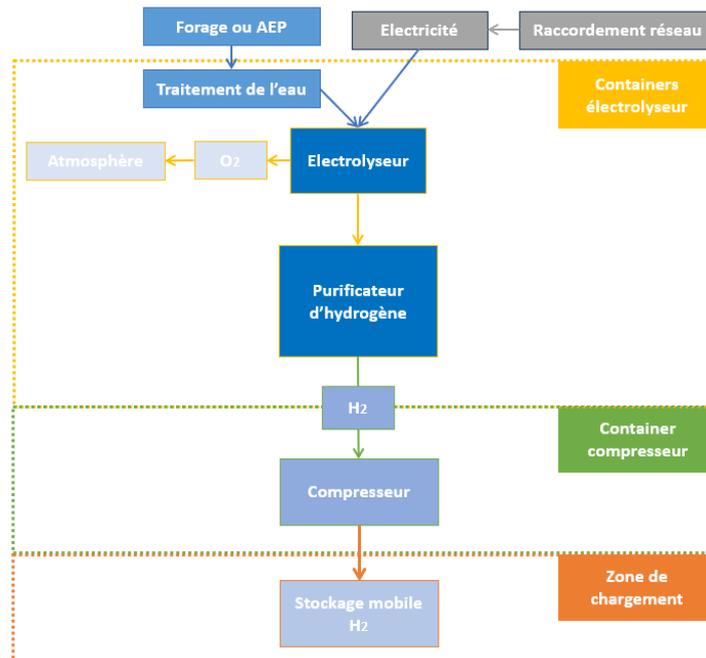


Figure 3. Schéma bloc du procédé de fabrication du site de Bessières

Les différentes étapes de production, du traitement de l'eau à la livraison sont détaillées dans les paragraphes suivants.

3.2.1.1 Traitement de l'eau

Le procédé d'électrolyse nécessite une eau déminéralisée à la conductivité prédéfinie. Pour cela l'eau utilisée pour le procédé est traitée suivant les étapes suivantes :

- Préfiltration : l'eau est filtrée à travers un filtre charbon actif pour réduire et absorber le chlore,
- Adoucissement de l'eau : cette étape permet de diminuer la dureté de l'eau en réduisant le taux de calcaire,
- Filtration de l'eau par un second filtre à charbon actif,

- Osmose inverse : cette méthode permet de purifier l'eau en séparant les ions, les molécules indésirables et les particules d'eau,
- Electro-déionisation continue de l'eau pour éliminer les sels résiduels et les composés aqueux ionisés,
- Réacteur UV : le passage de l'eau par le réacteur permet d'éliminer les matières organiques et empêcher la prolifération d'organismes pathogènes dans le réservoir de stockage.

L'eau ainsi déminéralisée est analysée par un capteur de conductivité : la conductivité mesurée doit être faible pour que l'eau soit utilisée par le procédé.

3.2.1.2 Electrolyseur

L'eau déminéralisée est décomposée en oxygène et hydrogène dans l'électrolyseur, via une réaction d'oxydoréduction.

Pour cela, de l'eau déminéralisée est introduite dans le séparateur O₂ (section anodique de la pile), qui a pour but d'alimenter l'électrolyse avec suffisamment d'eau très pure, de maintenir la température et de dégazer l'oxygène produit par l'électrolyse.

L'eau du séparateur O₂ est envoyée à l'anode de l'électrolyseur via la pompe de circulation.

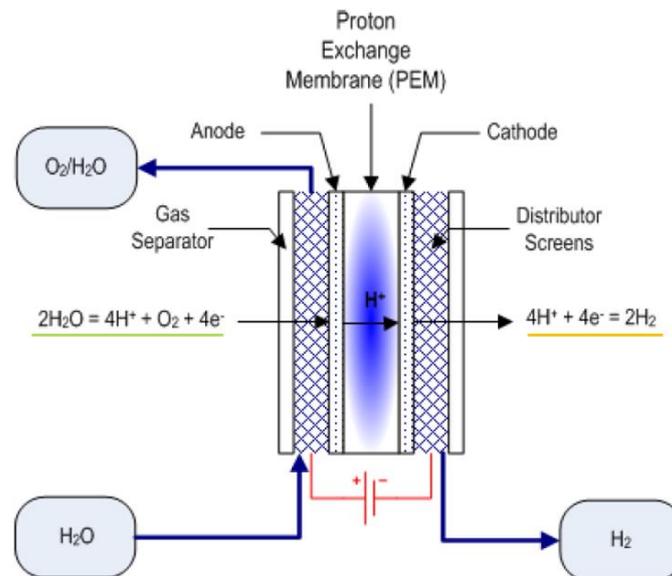


Figure 4. Principe de fonctionnement de la pile PEM

L'eau ainsi fournie à l'anode est décomposée électrochimiquement pour fournir de l'oxygène gazeux, des protons d'hydrogène (H⁺) et des électrons.

Les protons se déplacent à travers le PEM vers la cathode, tandis que les électrons se déplacent à travers le circuit électrique associé.

La section cathodique consiste à séparer l'eau de l'hydrogène pour conserver l'eau dans le système anodique.

L'eau séparée est recyclée vers l'anode au moyen d'une vanne de contrôle de niveau et de la pression de gaz dans la cuve cathodique. L'hydrogène est ensuite envoyé à l'installation de purification.

3.2.1.3 Purification de l'hydrogène

Cette étape comprend deux sous-étapes : la désoxygénation et le séchage. L'hydrogène produit est d'abord traité pour éliminer les particules d'oxygène avant d'être séché pour éliminer l'eau.

- Désoxygénation

L'hydrogène est d'abord refroidi pour condenser l'eau avant la section de traitement. L'oxygène résiduel est éliminé par un petit réacteur catalytique : le catalyseur réagit chimiquement avec l'oxygène présent pour former de la vapeur d'eau.

- Séchage

Le gaz produit est ensuite séché dans un séchoir à gaz à deux tours, ou le gaz passe sur un lit d'adsorbant de vapeur d'eau pour éliminer l'eau. Cet adsorbant a une capacité limitée d'adsorption d'eau et nécessite un fonctionnement en flux inverse d'hydrogène (une colonne sèche pour l'hydrogène et l'autre colonne régénère l'adsorbant).

Le gaz purifié atteint une qualité d'hydrogène avec moins de 5 ppm d'oxygène et 5 ppm d'eau, soit 99,999 % d'hydrogène pur.

3.2.1.4 Compresseur

Le site est équipé de deux compresseurs. Les compresseurs sont de type piston alternatif, avec un entraînement hydraulique. Etant donnée la conception des compresseurs, le gaz produit n'entre pas en contact avec l'huile, excluant ainsi le risque de contamination du fluide : la compression est considérée comme sans huile.

L'hydrogène produit est ainsi comprimé de 40 barg jusqu'à 400 barg pour être stocké à une pression cible maximale de 380 barg à 15°C (après refroidissement du gaz dans les cylindres des tube trailers / conteneurs à gaz à éléments multiples (CGEM)).

3.2.2 Zone de chargement des tube trailers / CGEM d'hydrogène

L'hydrogène est stocké directement dans des capacités de stockage mobiles (tubes trailers ou Conteneur à Gaz à Eléments Multiples (CGEM)) destinés au transport. La zone de chargement des tube trailers / CGEM d'hydrogène est implantée au Sud du site. Cette zone est équipée de huit loges séparées par des murs coupe-feu de 2h.

La distribution sera réalisée à partir d'une platine à gaz commune pour deux loges. Chaque platine à gaz est équipée de l'instrumentation requise pour la distribution de l'hydrogène, et d'un tuyau flexible pour connecter le système de production au conteneur. Une séquence prédéfinie est suivie au début de chaque chargement (mise à la terre de la remorque, connexion du flexible, test de mise sous pression notamment). Une interface avec plusieurs boutons poussoir permet de guider l'utilisateur (chauffeur formé ou personnel d'exploitation) dans la séquence avant le démarrage d'un chargement.

3.2.3 Utilités

Les utilités nécessaires au fonctionnement du site sont :

- L'air comprimé, utilisé pour la commande des vannes pneumatiques ;

- L'eau de refroidissement alimentant les compresseurs. Le système fonctionne en boucle fermée. Il comprend des pompes et des aéroréfrigérants. L'eau de refroidissement est à base de glycol pour éviter tout gel pendant la saison froide ;
- L'azote utilisé pour la purge de l'électrolyseur.

3.2.4 Zone de rétention des eaux

Le site dispose de deux bassins de rétention des eaux localisés au nord du site :

- Le bassin d'eaux pluviales est un bassin d'infiltration et de rétention dont le but premier est d'infiltrer les eaux pluviales, et le surplus est évacué vers le fossé par une pompe de relevage,
- Bassin de rétention des eaux incendie : en cas d'incendie, les eaux d'extinction seront récupérées dans ce bassin d'un volume de 160 m³.

3.3 Organisation de l'exploitation

Des procédures d'exploitation seront mises en place sur le site de Bessières et référencées en tant que documents internes. Ces procédures seront amenées à évoluer régulièrement, pour prendre en compte l'expérience acquise au fil de la vie de l'installation et des autres sites Lhyfe, selon un processus d'amélioration continue.

4 DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DU VOISINAGE

4.1 Situation géographique

Le site Lhyfe de Bessières est situé dans le lieu-dit « Les Prieurs », à l'Ouest du centre-bourg de la commune de Bessières (31). Il s'étend sur une superficie de 7 727 m².

Le terrain est la propriété de la société Lhyfe.

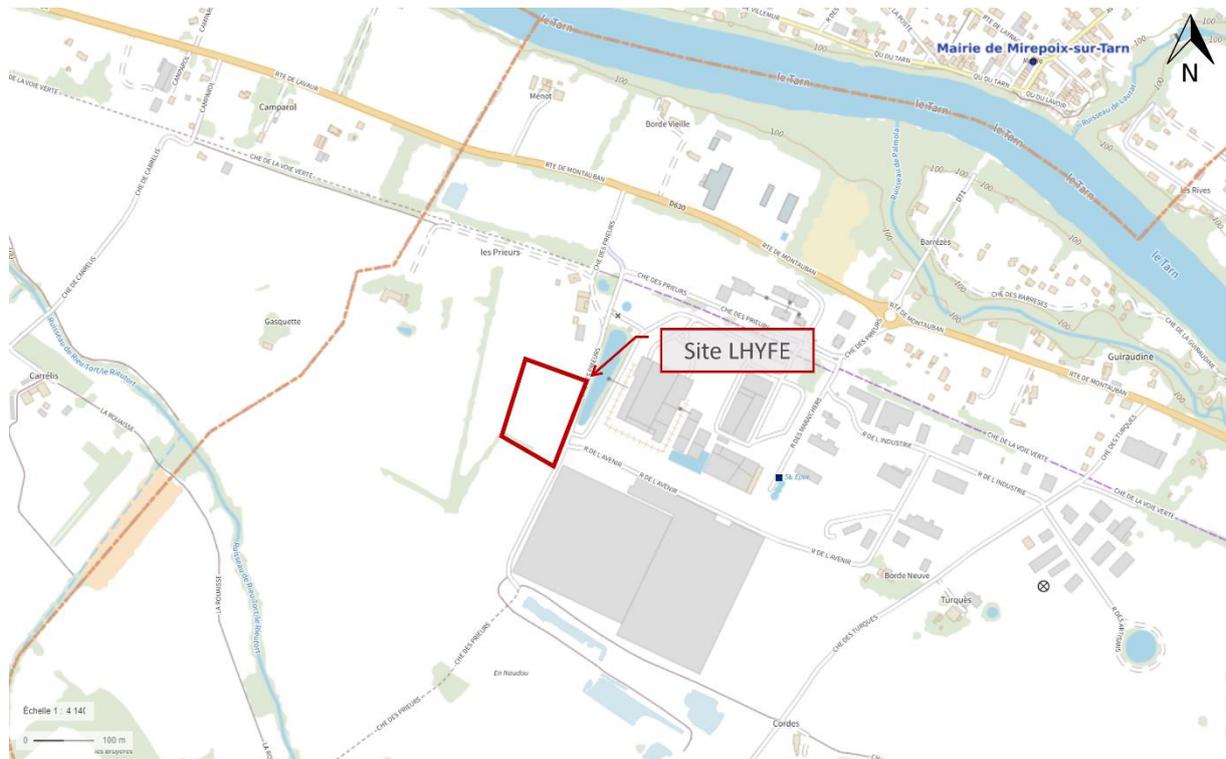


Figure 5. Implantation du site LHYFE de Bessières

4.2 Présentation de l'environnement naturel

4.2.1 Climatologie

4.2.1.1 Température, pluviométrie, ensoleillement, vent

Source : Météo France - <http://donneespubliques.meteofrance.fr> – consulté en janvier 2024

La station météo la plus proche, située à Lavar (81), à environ 20 km du site Lhyfe de Bessières, a été retenue pour cette étude. La station de Toulouse-Blagnac, située dans le même département que la commune de Bessières, est distante du site d'environ 27 km et les deux points sont séparés par le fleuve de la Garonne, pouvant entraîner des différences climatiques notables.

Les données présentées ci-dessous représentent les statistiques établies sur la période 1991 – 2022, ainsi que les records enregistrés sur la période Juillet 1985 à Janvier 2024, pour la station « Lavour » :

Températures		
Température la plus élevée	42,6 °C	2023
Température la plus basse	-18 °C	1987
Température maximale (moyenne)	19,2 °C	-
Température moyenne	13,6 °C	-
Température minimale (moyenne)	8 °C	-
Pluviométrie		
Hauteur quotidienne maximale de précipitations	96,4 mm	1997
Hauteur de précipitations (moyenne)	701,8 mm	-
Ensoleillement		
Durée d'insolation annuelle (moyenne)	Non disponible	-
Vent		
Rafale maximale de vent	30 m/s	2009

Tableau 5. Données climatiques station Lavour (1991 - 2020) - SOURCE METEO France

4.2.1.2 Foudre

Source : Météorage carte interactive – <https://www.meteorage.fr> – consulté en janvier 2024

La foudre fait partie des événements naturels indésirables pouvant être à l'origine de la survenance d'un accident : incendie, explosion, destruction de biens, dysfonctionnements des équipements de gestion informatique et électronique, etc.

Les statistiques de foudroiement comptabilisent en moyenne 1 impact/km²/an à Bessières, ce qui correspond à un foudroiement faible et légèrement inférieur à la moyenne nationale de 1,1 /km²/an.

4.2.2 Hydrographie

4.2.2.1 Réseau hydrographique

Le site Lhyfe de Bessières est implanté sur le bassin versant « Le Tarn du confluent de l'Agout au confluent de l'Aveyron », selon le SIE du Bassin Adour Garonne.

Trois cours d'eau sont localisés à proximité du site Lhyfe de Bessières :

- Le Tarn s'écoule à environ 500 m au Nord,
- Le Ruisseau du Rieu Tort, s'écoule à environ 500 m à l'Ouest, en direction du Tarn,
- Le Ruisseau de Palmola, s'écoule à environ 600 m du projet, en direction du Tarn.

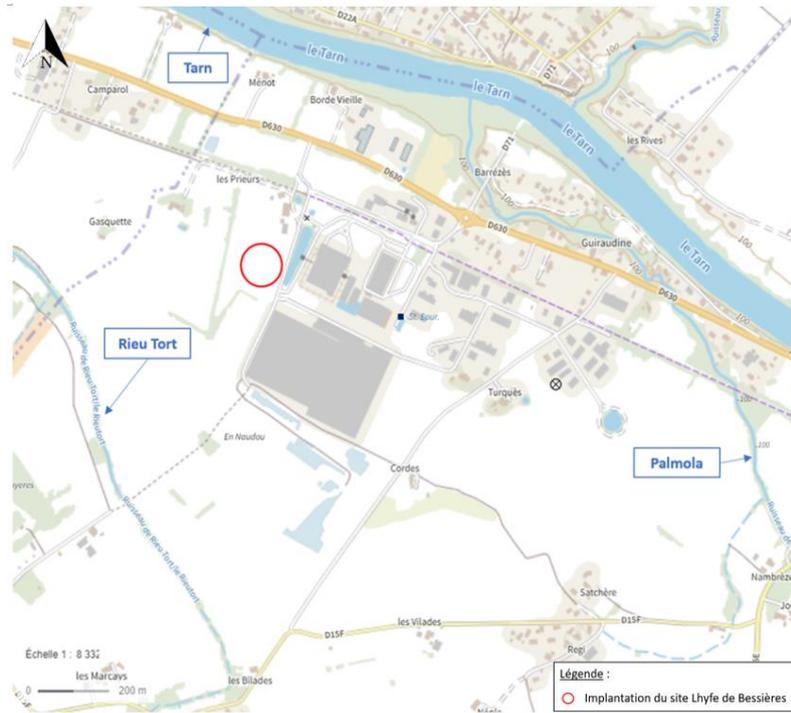


Figure 6. Localisation des cours d'eau à proximité du projet (Source : Géoportail)

4.2.2.2 Risque inondation

La commune de Bessières est couverte par un Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) du Tarn approuvé le 31 décembre 2008 par arrêté préfectoral.

D'après le zonage de ce PPRI, le site Lhyfe de Bessières n'est pas situé dans une zone inondable :

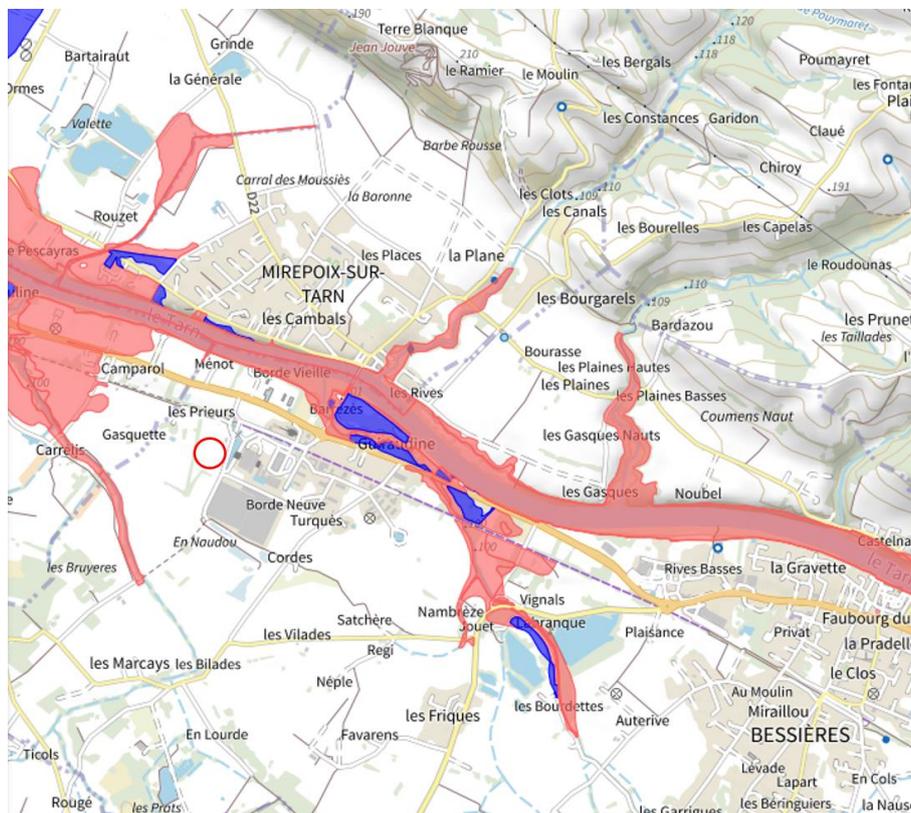


Figure 7. Zonage PPRI Tarn (Source : Georisques)

5 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

5.1 Introduction

L'identification et la caractérisation des potentiels de dangers sont des étapes préalables nécessaires à la réalisation de l'analyse des risques d'un site industriel.

Les différents potentiels de dangers étudiés dans ce chapitre sont :

- Ceux intrinsèques aux produits mis en œuvre ;
- Ceux liés à l'installation (quantité de produit mise en jeu, conditions de process et de stockage mises en œuvre) ;
- Ceux liés aux phases transitoires (arrêt, redémarrage, maintenance...)
- Ceux liés aux pertes d'utilités ;
- Ceux liés à l'environnement, qui peuvent être de deux types sur le site Lhyfe de Bessières :
 - Phénomènes d'origine naturelle : hydrologie, climatologie, géologie ;
 - Phénomènes d'origine anthropique : réseau routier, intrusion et malveillance....

5.2 Identification des dangers intrinsèques aux produits mis en œuvre

5.2.1 Produits dangereux et propriétés

Cette partie de l'étude a pour but de présenter et d'analyser les caractéristiques physico-chimiques des produits dangereux présents sur le site Lhyfe de d'une part, et d'autre part de décrire les moyens mis en œuvre pour la prévention et la protection en cas d'éventuels accidents.

Les produits dangereux mis en œuvre sur le site de Bessières sont :

- L'hydrogène ;
- L'huile de lubrification des compresseurs ;
- L'azote ;
- Diesel.

Une synthèse des Fiches de Données de Sécurité (FDS) de ces produits est présentée dans le tableau ci-dessous :

Produit	Quantité maximale	Etat	Conditionnement	Pression de service	Température de service	Point éclair (°C)	Température D'ébullition (°C)	LIE / LSE (%vol)	Mention de dangers
Hydrogène	< 5 t	Gazeux	Tuyauteries et cylindres en matériau composite ou métalliques	40 barg à 400 barg	30 à 40°C	NA	-253 °C	(LII / LSI) 4% / 77%	<i>H220</i> : Gaz extrêmement inflammable <i>H280</i> : Contient un gaz sous pression, peut exploser sous l'effet de la chaleur
Huile de lubrification des compresseurs	200 L	Liquide	2 réservoirs dans chaque compresseur	325 barg maximum	70 °C	> 234°C	> 316°C	0,9% / 7%	<i>H361</i> : Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus
Azote	300 Nm ³	Gazeux	Bouteilles 50L à 200 barg	10 barg	30 °C	-	-	-	<i>H280</i> : Gaz sous pression ; peut exploser sous l'effet de la chaleur
Diesel	1 000 L	Liquide	Cuves à carburant	Pression atmosphérique	Ambiante	>55°C	> 65°C	1% / 6%	<i>H226</i> - Liquide et vapeurs inflammables. <i>H304</i> - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires. <i>H315</i> - Provoque une irritation cutanée. <i>H332</i> - Nocif par inhalation. <i>H351</i> - Susceptible de provoquer le cancer. <i>H373</i> - Risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée. <i>H411</i> - Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme.

Tableau 6. Produits dangereux présents sur le site Lhyfe de Bessières

5.2.2 Déchets produits par le site

Le procédé de fabrication d'hydrogène engendre uniquement des eaux surminéralisées. Ces eaux sont rejetées dans le milieu naturel et ne sont pas considérées comme déchets.

5.2.3 Risques d'incompatibilité

La seule possibilité de mélange dangereux identifiée sur l'installation Lhyfe de Bessières entre deux produits mis en œuvre sur le site correspond au mélange d'hydrogène (H₂) et d'oxygène (O₂) sous forme gazeuse. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un mélange « incompatible » dans la mesure où un catalyseur tel que le platine, ou encore l'apport d'une énergie d'inflammation est requis pour initier la réaction.

Bien que produits par la réaction d'électrolyse, ces deux composés sont générés au niveau de chaque électrode de l'équipement et immédiatement séparés puis orientés vers deux séparateurs distincts.

La conception intrinsèque de l'électrolyseur ne permet donc pas un mélange direct des gaz hydrogène et oxygène.

5.3 Identification des dangers liés à l'installation

Les équipements qui présentent des potentiels de dangers sur le site de Bessières sont recensés ci-dessous :

Opération / Equipement	Nature des potentiels de dangers
Electrolyseur	Explosion interne Explosion confinée Jet enflammé Flash fire/ UVCE
Compresseurs	Explosion confinée Flash fire/ UVCE Jet enflammé
Capacité tampon haute pression	Eclatement de capacité
Tuyauteries d'hydrogène	Flash-fire/UVCE Jet enflammé
Cylindres de stockage H ₂	Eclatement de capacité
Chargement d'hydrogène par flexible	Flash fire / UVCE Jet enflammé

Tableau 7. Identification des potentiels de dangers liés à l'installation

5.4 Identification des dangers liés aux phases d'arrêt ou transitoire

En phase transitoire (arrêts et redémarrages de l'installation), le principal danger résiduel est lié à la présence d'hydrogène dans les installations de procédé. Des procédures d'exploitation encadrant les manœuvres correspondantes sont rédigées et tenues à jour par le personnel compétent.

L'installation est mise à l'arrêt et intégralement purgée à l'azote en cas de travaux au niveau des équipements.

5.5 Identification des dangers liés à la perte d'utilités

Les potentiels de dangers liés à la perte d'utilités sont limités sur le site Lhyfe de Bessières.

En cas de perte du réseau électrique, de l'air comprimé ou de l'azote, les principaux équipements seront mis à l'arrêt, les vannes pneumatiques basculeront dans leur position de sécurité (vannes « fail safe »).

Les équipements de sécurité, la centrale incendie et le système d'accès par badge seront maintenus en service grâce à la présence d'onduleurs.

La perte de l'eau de refroidissement engendre la montée en température du procédé. Elle peut être détectée de multiples manières (détection de pression basse, détection de débit bas) sur le circuit d'eau de refroidissement. L'augmentation de température au niveau du procédé sera détectée par des asservissements de sécurité qui déclencheront un arrêt d'urgence du procédé.

La perte d'une de ces utilités est détectée par un réseau de capteurs dédiés et déclenche des alarmes permettant aux exploitants d'intervenir.

5.6 Identification des dangers liés à l'environnement naturel

5.6.1 Foudre

Les statistiques de foudroiement comptabilisent en moyenne 1,12 impact/km²/an en Haute-Garonne, ce qui correspond à un foudroiement faible. La Haute-Garonne est ainsi classée en 36^{ème} position sur les 96 départements métropolitains.

L'Arrêté Ministériel du 4 octobre 2010 modifié relatif à la prévention des risques accidentels au sein des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement soumises à Autorisation sera applicable au site Lhyfe de Bessières, au titre de la rubrique 4715. Concernant les dispositions relatives à la protection contre la foudre, il est notamment demandé que les missions suivantes soient réalisées par des organismes reconnus et compétents :

- Analyse du Risque Foudre (ARF) ;
- Etude Technique (ET) ;
- Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE) ;
- Installation et vérification des protections.

Le risque dû à la foudre sur le site correspond à une décharge électrique au niveau de la zone de stockage pouvant être à l'origine d'un incendie ou une explosion.

En se basant sur les premières études relatives à la protection contre la foudre réalisées, des travaux d'installation de systèmes de protection contre la foudre ont été réalisés sur le site Lhyfe de Bessières par des entreprises compétentes.

Le potentiel de dangers lié à la foudre n'est donc pas retenu comme événement initiateur pour la suite de l'étude.

5.6.2 Inondation

D'après le zonage du Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) du Tarn, le site Lhyfe de Bessières n'est pas situé en zone inondable.

Le potentiel de dangers lié à l'inondation n'est donc pas retenu comme évènement initiateur pour la suite de l'étude.

5.6.3 Séisme

La commune de Bessières est située en zone de sismicité 1 – Très faible.

Les bâtiments et ouvrages du site ont été construits dans le respect des règles applicables correspondant à cette zone. Le projet ne modifie pas les structures et fondations existantes, et n'est par conséquent pas concerné par la problématique « séisme ».

Le potentiel de dangers lié au séisme n'est donc pas retenu comme évènement initiateur possible dans la suite de l'étude.

5.6.4 Climatologie

- Vent :

Le risque induit par des vents violents correspond généralement à la chute d'un élément de hauteur importante sur les installations du site concerné, pouvant générer un accident.

La vitesse maximale des vents enregistrée sur la période 1991-2020 sur la station de Lavaur correspond à la valeur de 30 m/s, atteinte en 2009.

Aucun élément de grande hauteur n'étant présent à proximité du site, le potentiel de danger lié aux vents violents n'est pas retenu pour la suite de l'étude.

- Gel :

Le risque principal induit par des températures très basses correspond au gel des canalisations d'eau incendie, les rendant ainsi inutilisables en cas de sinistre.

Sur le site de Bessières, les canalisations d'eau incendie sont enterrées puis identifiées par un traçage au niveau des parties aériennes.

La température minimale moyenne est de 8°C : le risque lié au gel n'est donc pas retenu.

5.7 Risques d'origine anthropique

5.7.1 Réseau routier

Le site est accessible par le chemin des prieurs, longeant le site à l'est.

La rue « Chemin des prieurs » dessert les industriels de la zone d'activité du Parc économique du Triangle, dont Lhyfe. Cette zone étant en plein développement, seuls trois industriels sont recensés. Aucune donnée concernant le trafic de cette rue n'est répertoriée, il peut néanmoins être considéré comme faible.

La zone d'activité est desservie par la départementale D630, située à 350 m au nord des installations de Lhyfe Bessières. En 2019, le trafic routier au niveau de la départementale s'élevait à 5 752 véhicules, dont 4,7% de poids-lourds.

Il convient par ailleurs de noter qu'à l'intérieur de la clôture du site, la circulation de véhicules est limitée aux camions transportant les capacités de stockage mobile d'hydrogène, dont la circulation est strictement encadrée (vitesse réduite à 5 km/h, zone de manœuvre explicite, dételage des remorques pour leur chargement et départ du tracteur du site pendant cette phase). Pendant les phases de maintenance, des chariots élévateurs sont susceptibles de circuler ponctuellement sur site. Leur circulation est également encadrée (formation du personnel d'exploitation à la conduite de chariots, établissement d'un plan de circulation, protection des canalisations d'hydrogène contre les chocs).

Le potentiel de danger lié au trafic routier n'est pas retenu pour la suite de l'étude.

5.7.2 Réseau ferroviaire

La ligne ferroviaire la plus proche se situe à environ 7 km à l'Ouest du site.

Le potentiel de dangers lié à la circulation ferroviaire n'est donc pas retenu comme évènement initiateur possible dans la suite de l'étude.

5.7.3 Chute d'un aéronef

Le risque de chute d'un aéronef sur un site ICPE est identifié notamment lorsque le site se trouve dans l'axe d'une piste, au décollage ou à l'atterrissage.

Les conséquences d'une chute d'aéronef sur le site seraient l'émission de projectiles, l'incendie ou l'explosion si l'appareil s'écrase sur une installation sensible.

La piste de décollage et atterrissage de l'aérodrome de Gaillac - Lisle-sur-Tarn le plus proche se situe à environ 25 km au Nord-Est du site Lhyfe de Bessières.

Conformément au point 1.2.1 de la Circulaire du 10 mai 2010, le site se trouvant à plus de 2 000 m de toute piste de décollage et d'atterrissage, **le potentiel de dangers lié à la chute d'aéronef n'est pas retenu comme évènement initiateur possible dans la suite de l'étude.**

5.7.4 Intrusion- Malveillance

En cas d'intrusion ou de malveillance, une baisse du niveau de sécurité due à une dégradation du matériel et des gestes criminels pouvant conduire à un incendie ou une explosion seraient à craindre.

L'établissement Lhyfe de Bessières est notamment protégé par :

- Un accès restreint par badge aux portails piéton et camions ;
- Une clôture grillagée rigide de 2 m de haut avec un trottoir au niveau du sol ;
- Une vidéosurveillance à différents points du site avec un appel des secours (surveillance périmétrique et surveillance des installations process, avec contrat auprès d'une entreprise de sécurité pour effectuer de la levée de doute sur détection et envoi des forces de l'ordre).

Ces mesures sont de nature à prévenir une intrusion au niveau des installations à risque du site. Conformément aux dispositions de la Circulaire du 10 mai 2010, **l'intrusion et les actes de malveillance ne sont pas considérés comme évènement initiateur possible dans la suite de l'étude.**

5.7.5 Facteur humain

L'erreur humaine peut être à l'origine d'incident ou d'accident sur un site industriel et peut provenir :

- Des exploitants de l'installation : ceux-ci ont reçu des formations internes et externes spécifiques, en adéquation avec les activités et les risques de l'installation. De plus, des moyens de prévention matériels et organisationnels sont en place sur le site.
- Des entreprises extérieures : il est précisé dans le manuel HSE du site de Bessières que de nombreux moyens pour gérer l'intervention des entreprises sur le site sont en place (accueil sécurité, permis de travail spécifique, plan de prévention, processus travaux, etc). De plus, Lhyfe audite le personnel sous-traitant afin de vérifier que les mesures de sécurité sont appliquées.

De manière prudente et conservative, le potentiel de danger lié au facteur humain est néanmoins pris en compte dans la suite de l'étude.

5.7.6 Installations industrielles extérieures à l'établissement

Dans un rayon de 1,5 km autour du site, trois Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) sont recensées :

- SOLVALOR, situé à l'ouest du site Lhyfe, est une ICPE soumise à Autorisation au titre des rubriques :
 - 2170-1- Engrais, amendements et supports de culture (fabrication des) à partir de matières organiques, à l'exclusion des rubriques 2780 et 2781,
 - 2718-1- Installation de transit, regroupement ou tri de déchet dangereux, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2710, 2711, 2712, 2719, 2792 et 2793,
 - 2790- Installation de traitement de déchets dangereux, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2711, 2720, 2760, 2770, 2792, 2793 et 2795,
 - 2791-1- Installation de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2515, 2711, 2713, 2714, 2716, 2720, 2760, 2771, 2780, 2781, 2782, 2794, 2795 et 2971,
 - 3510- Traitement de déchets dangereux,
 - 3531- Élimination des déchets non dangereux non inertes avec une capacité de plus de 50 tonnes par jour, supposant le recours à une ou plusieurs des activités suivantes, à l'exclusion des activités relevant de la directive 91/271/CEE du Conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires,
 - 3532- Valorisation de déchets dangereux,
 - 3550- Stockage temporaire de déchets.

Le site emploie 15 personnes.

- Econotre, situé à environ 50 m à l'est du site est une ICPE soumise à Autorisation au titre des rubriques :
 - 2771 – Traitement thermique des déchets non dangereux,
 - 3520-a – Incinération ou coïncinération de déchets non dangereux.

Le site emploie en moyenne 85 personnes.

- SARL SAD, situé en environ 275 m à l'Est du site est une ICPE soumise à Autorisation au titre de la rubrique 2740 – Incinération de cadavres d'animaux. Le site emploie en moyenne 85 personnes.

Aucun Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) prescrit ou approuvé, ni de zone à risque entraînant une servitude d'utilité publique n'est identifié sur la commune de Bessières.

Par ailleurs, l'étude de dangers du site SOLVALOR a été consultée. Aucun effet thermique ou de suppression prenant source des installations du site SOLVALOR n'est susceptible d'atteindre les limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Le potentiel de dangers lié à une installation industrielle extérieure à l'établissement n'est donc pas retenu pour la suite de l'étude.

5.8 Conclusion

Les potentiels de dangers conservés pour la suite de l'étude sont les suivants :

- Propriétés des produits mis en œuvre ;
- Equipements installés sur le site ;
- Phases transitoires d'exploitation ;
- Perte d'utilité ;
- Facteur humain.

6 RETOUR D'EXPERIENCE ET ENSEIGNEMENTS

6.1 Préambule

L'étude de l'accidentologie a pour objectif l'analyse des causes et conséquences de défaillances ayant conduit à un accident sur des installations similaires à celles du site LHYFE de Bessières. Cette démarche permet de préciser et compléter l'analyse des risques du site, développée aux chapitres 8 et 9 du présent document.

Un inventaire et une sélection d'accidents ont été réalisés pour des installations ou équipements comparables à ceux mis en œuvre sur le site LHYFE de Bessières. Ces événements ont été analysés et les mesures de prévention et de protection existantes permettant d'en prévenir l'occurrence ou d'en limiter les conséquences ont été détaillées.

La sélection des accidents se fait généralement via deux canaux :

- **L'accidentologie interne** résultant d'un retour d'expérience du site ou de sites appartenant au même groupe ;
- **L'accidentologie externe** répertoriée dans des bases de données telles que la base de données ARIA du Bureau d'Analyse des Risques et des Pollutions Industrielles (BARPI).

6.2 Accidentologie interne

Le site a été mis en service au premier semestre 2024. Aucun accident n'est recensé sur le site Lhyfe de Bessières.

De plus, le site Lhyfe de Bouin, premier site à l'échelle industrielle mis en œuvre par la société a recensé un seul accident sans conséquences. Une fuite a eu lieu sur le joint d'une bride du circuit d'hydroxyde de potassium de l'usine, au niveau de l'électrolyseur. De l'hydroxyde de potassium (KOH) s'est répandu dans une rétention sous l'électrolyseur et sur le sol de la halle technique. A l'occasion d'un relevé sur site, un membre du personnel a constaté la fuite et a immédiatement donné l'alerte. Le process est mis à l'arrêt et l'hydroxyde de potassium restant dans le circuit a été transvasé dans le réservoir du site, qui a ensuite été isolé. Pour prévenir toute contamination, les réseaux EP/EU du site sont isolés, le produit ayant été épandu dans une rétention et sur le sol de la halle technique, sans atteindre les bondes d'évacuation du sol de la halle qui sont occultées par défaut, et l'étaient avant l'accident. Dotés d'EPI pour intervention chimique, les opérateurs récupèrent le l'hydroxyde de potassium épandu. Le produit récupéré (volume estimé à 500 L) est disposé en récipient GRV les absorbants dans une poubelle dédiée pour évacuation.

Le procédé PEM utilisé sur le site Lhyfe de Bessières diffère de celui utilisé sur le site Lhyfe de Bouin et n'implique pas l'utilisation d'hydroxyde de potassium. Par conséquent, un incident du même type ne pourrait pas se produire sur le site Lhyfe de Bessières.

6.3 Accidentologie externe

Le procédé utilisé à Bessières (PEM) est très récent à l'échelle industrielle et aucun retour d'expérience spécifique pertinent sur des installations comparables n'est disponible. Une recherche a été menée sur la base de données ARIA du BARPI en utilisant les mots-clés suivants :

- Electrolyse + hydrogène (27 résultats) ;
- Stockage sous pression + hydrogène (15 résultats) ;
- Réservoir + hydrogène (51 résultats) ;
- Compresseur + hydrogène (38 résultats) ;
- Unité de production + hydrogène (39 résultats).

170 résultats ont été obtenus. Les accidents répertoriés sont survenus sur des installations industrielles de secteurs d'activités différents. Une illustration des effets recensés pour tous ces accidents est présentée dans le diagramme ci-dessous.

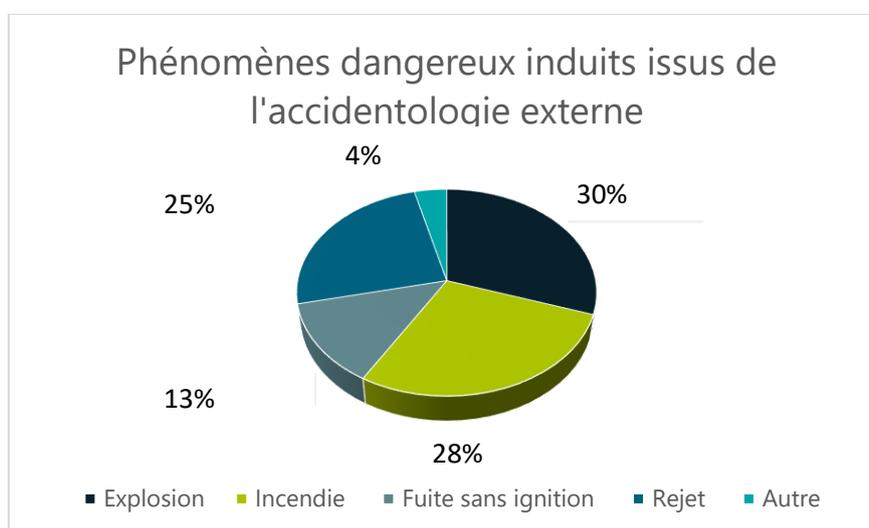


Figure 8. Diagramme des types de phénomènes dangereux issus de l'accidentologie externe

Une sélection de 8 accidents représentatifs de l'activité de fabrication et de stockage d'hydrogène a été faite :

N°ARIA	Date & lieu de l'accident	Description accident	Mesures en place sur le site Lhyfe de Bessières
19325	21/10/1993 - ALLEMAGNE	Lors de travaux sur le réseau électrique un fusible fond provoquant la fermeture de la vanne d'arrêt montée sur le manifold des compresseurs à piston. En amont, la cloche du gazomètre se remplit d'H ₂ jusqu'à son niveau maximum, provoquant la fermeture de la vanne de régulation de débit. Une dépression dans la conduite à l'aspiration des compresseurs se produit, conduisant à une entrée d'air et une explosion suite au mélange d'air et d'H ₂ .	<ul style="list-style-type: none"> • En cas de travaux sur les installations de Lhyfe, celles-ci seront purgées et mises à l'arrêt. • Arrêt du compresseur sur détection de pression basse. • Conception du compresseur rendant impossible la mise sous vide à l'aspiration du compresseur.

N°ARIA	Date & lieu de l'accident	Description accident	Mesures en place sur le site Lhyfe de Bessières
43286	17/01/2013 – FRANCE	Une explosion a lieu dans une salle d'électrolyse d'une usine de chlorochimie à l'arrêt depuis 2 semaines. Des travaux de découpe sur un collecteur d'H ₂ sont en cours en même temps qu'un opérateur réalise des purges du circuit de saumure. Le collecteur d'H ₂ explose suite à un mélange d'air entré et d'H ₂ restant dans le collecteur (normalement purgé à l'azote).	<ul style="list-style-type: none"> Le site de Lhyfe de Bessières disposera d'une procédure pour la réalisation des permis de travail afin d'éviter toute incompréhension entre les différents acteurs. Des audits de sous-traitants peuvent être réalisés par le personnel de Lhyfe dans le but de vérifier le respect des consignes de sécurité par les opérateurs.
53902	23/05/2019 – COREE-DU-SUD	L'explosion d'un réservoir d'hydrogène se produit dans un centre de recherche de piles à combustible. Au moment de l'explosion, l'entreprise utilisait l'H ₂ de ce réservoir alors que des essais étaient en cours. Une entrée d'air ou une possible perméation de la membrane et une étincelle seraient à l'origine de l'explosion.	<ul style="list-style-type: none"> Le stockage sur le site de Bessières est limité à l'inventaire des stockages mobiles (cylindres de 1 650 L maximum), capacité bien inférieure à celle des réservoirs de 40 m³ dans le centre de recherche. Des procédures d'exploitation seront mises en place sur le site pour toute opération.
53903	01/06/2019 – ETATS-UNIS	Une explosion puis un incendie se produisent sur le parking camions d'une entreprise de production et de stockage d'H ₂ liquide et gazeux. L'origine de cet accident serait une fuite d'H ₂ lors du remplissage d'une remorque porte-tubes.	<ul style="list-style-type: none"> Sur le site de Bessières, la séquence de remplissage sera automatisée et le circuit subira un test d'étanchéité.
53772	10/06/2019 – NORVEGE	Une station-service d'hydrogène norvégienne subit une explosion suivie d'un incendie. Un périmètre de sécurité de 500 m est mis en place par les pompiers. L'incendie est maîtrisé en 2h30. D'après l'enquête, l'origine de l'explosion serait un mauvais serrage d'une bague située juste avant une bouteille de stockage, provoquant une fuite d'H ₂ puis un nuage inflammable.	<ul style="list-style-type: none"> La pression de service du stockage d'hydrogène en Norvège était de 950 bar tandis qu'à Bessières la pression de stockage est de 380 bar maximum. La séquence de remplissage est automatisée et le circuit subit un test d'étanchéité. Des routines d'inspection impliquant des recherches de fuite sont mises en place.

N°ARIA	Date & lieu de l'accident	Description accident	Mesures en place sur le site Lhyfe de Bessières
55834	30/07/2020 - FRANCE	<p>Une fuite d'H₂ au niveau d'une remorque en cours de chargement est constatée. L'inflammation de la fuite entraîne une propagation du feu aux pneumatiques du camion et des 2 semi-remorques stationnés à côté.</p> <p>L'incendie est maîtrisé au bout de 2 heures. Une reprise du feu est constatée 7 heures après sur les pneumatiques d'une semi-remorque, et l'incendie est éteint 7 heures après. Les eaux d'extinction nécessaires dépassaient la capacité du bassin de rétention et un faible rejet dans l'environnement a été réalisé.</p> <p>La source de la fuite pourrait se situer sur la lyre de connexion bouteille / collecteur, une bouteille ou sur le collecteur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les loges contenant les remorques chargées ou en cours de chargement sont séparées par des murs béton coupe-feu 2h, évitant ainsi une propagation de l'incendie. • Un système anti-arrachement est intégré sur le flexible liant la ligne d'hydrogène aux bouteilles de stockage, évitant ainsi la vidange des bouteilles chargées.
56348	23/09/2020 - FRANCE	<p>Une fuite d'H₂ conduisant à la formation d'une boule de feu est constatée lors du remplissage d'un semi-remorque.</p> <p>L'alimentation hydrogène du site est coupée automatiquement grâce aux dispositifs de sécurité.</p> <p>L'opérateur venait de déconnecter le flexible de remplissage. Cependant, le câble anti-fouet du flexible est resté attaché. De l'hydrogène sous pression est arrivé dans le flexible déconnecté, provoquant la fuite.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les loges contenant les remorques chargées ou en cours de chargement sont séparées par des murs béton coupe-feu 2h, évitant ainsi une propagation de l'incendie. • Une détection de flamme spécifique à l'hydrogène est mise en place dans les loges de chargement, entraînant un arrêt d'urgence du site en cas de détection.
60961	05/09/2022 - FRANCE	<p>Une inflammation d'H₂ (1 min) se produit en sortie de cheminée d'électrolyse. Elle est causée par un violent orage. 900 grammes d'H₂ sont brûlés à la torche.</p> <p>Après déclenchement d'une alarme température haute, les flammes sont éteintes. Les électrolyseurs, la production et la génération d'hydrogène au niveau de la cheminée sont stoppés manuellement. Les équipements détériorés sont remplacés et remis en service presque 3 heures après le début de l'évènement.</p> <p>La foudre a frappé le site au niveau d'un échafaudage non démonté. De plus, l'exploitant ne prévoit pas de baisse de production lors des épisodes orageux. L'exploitant prévoit des mesures correctives suite à cet évènement.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le site a fait l'objet d'une analyse de risque foudre et d'une étude technique foudre pour équiper le site des équipements nécessaires pour la protection contre la foudre. • En amont des travaux, l'exploitant s'assurera de réaliser des permis travaux pour évaluer les risques de la coactivité.

Tableau 8. Accidentologie externe

Ces observations sont cohérentes avec l'analyse faite en 2022 de l'ensemble de la base ARIA réalisée par le BARPI.

En effet, 377 événements (français ou étrangers) relatifs aux procédés industriels impliquant de l'hydrogène (produit ou généré accidentellement) ont été recensés (chiffres arrêtés au 1er janvier 2021 et dont le plus ancien événement recensé remonte à 1921). Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- 72% des phénomènes engendrés sont des incendies et/ou explosions, tandis que 28% concernent des fuites d'hydrogène non enflammées ou des contraintes engendrées par l'hydrogène sur les matériaux, sans conséquence humaine.
- Les incendies et/ou explosions sont souvent associés à des conséquences humaines. Ces phénomènes ont été identifiés dans 158 événements parmi les 251 événements répertoriés en France. 7 d'entre eux ont causé la mort d'au moins une personne et 46 des blessés.

6.4 Conclusion

L'étude de l'accidentologie permet de conclure que les accidents sur des installations comparables sont rares.

Il apparaît néanmoins que les événements indésirables susceptibles de se produire au niveau des équipements mis en œuvre sur le site Lhyfe de Bessières correspondent à des fuites d'hydrogène suivies des phénomènes d'incendie et/ou d'explosion ou à des entrées d'air suivies d'une explosion interne.

Les informations fournies par la base de données ARIA ne précisent pas toutes les mesures de prévention et protection mises en œuvre sur les différents sites sinistrés. Seules certaines conditions opératoires (pression, volume) ont pu être comparées à celles du site Lhyfe de Bessières. Il a néanmoins pu être mis en évidence que la réalisation de travaux sur des unités en service concerne trois des huit accidents étudiés en détail. L'arrêt systématique de l'unité lors de phase de travaux permet de prévenir efficacement l'occurrence de telles séquences accidentelles sur le site Lhyfe de Bessières.

En conséquence, bien que des conditions opératoires plus favorables et que des barrières supplémentaires efficaces soient mises en œuvre sur le site Lhyfe de Bessières par rapport aux installations sinistrées, les phénomènes dangereux suivants ne peuvent être totalement exclus de l'analyse des risques du site de Lhyfe :

- Fuite d'hydrogène suivie de l'inflammation du nuage inflammable ainsi créé puis un incendie et/ou une explosion ;
- Explosion interne à un équipement ;
- Eclatement de capacité.

7 REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS

La réduction des potentiels de dangers à la source est généralement axée sur trois principes :

- Substitution : préférer l'utilisation de produits moins dangereux ayant les mêmes propriétés que les produits dangereux utilisés ;
- Intensification : minimiser les quantités de produits dangereux stockés ;
- Atténuation : opérer dans des conditions opératoires moins dangereuses.

7.1 Principe de substitution

Le principal produit dangereux mis en œuvre sur le site Lhyfe de Bessières est l'hydrogène, du fait de sa haute inflammabilité. S'agissant du produit fabriqué par Lhyfe sur le site et justifiant la nature de l'activité de l'installation, il n'est pas possible de le substituer par un composé moins dangereux.

Les autres matières ou substances dangereuses, présentées au chapitre 5.2 du présent document, ne présentent pas de risques particuliers ou sont mises en œuvre sur le site dans des quantités limitées ne posant pas de problématique spécifique.

7.2 Principe d'intensification

La modification du site justifiant la présente Etude De Dangers concerne une augmentation de la capacité de stockage d'hydrogène pour subvenir à la demande croissante de ce nouveau carburant vert et non polluant.

La société Lhyfe n'est donc pas en mesure de minimiser la quantité d'hydrogène mise en œuvre sur le site de Bessières, dans le cadre du projet d'évolution de l'installation.

7.3 Principe d'atténuation

Les accidents récents sur des installations de production ou de stockage d'hydrogène recensés au chapitre 6 concernent notamment des équipements ayant des conditions opératoires plus sévères :

- Pression de service (n°ARIA : 53772) : en Norvège l'hydrogène était stocké à 950 barg contre 380 barg chez Lhyfe ;
- Volume de stockage (n°ARIA : 53902) : en Corée du Sud, le centre de recherche disposait de 3 réservoirs internes dont le volume unitaire était de 40 m³. Sur le site Lhyfe de Bessières, l'hydrogène est stocké en bouteilles de 1650 L au maximum dans des remorques spécifiquement conçues pour résister aux agressions extérieures. En outre, chaque remorque est chargée dans des loges séparées les unes des autres par des murs en béton ;

Au vu du retour d'expérience, le principe d'atténuation est pris en compte et appliqué sur le site Lhyfe de Bessières dès la phase de conception.

7.4 Mesures de prévention et protection mises en œuvre sur le site

De nombreuses mesures ont été mises en place dans le but de réduire les risques et les conséquences d'accidents potentiels sur le site. Elles peuvent relever de :

- La prévention : installées dans le but de détecter une défaillance avant la survenue d'un accident et d'en prévenir l'occurrence, ces barrières peuvent avoir une action sur le procédé pour le mettre en sécurité, relever de la conception des équipements ou encore reposer sur des procédures organisationnelles ;
- La protection : en cas de survenue d'un accident, ces barrières permettent de réduire ou de supprimer les effets sur les hommes, l'environnement et les équipements.

Les mesures de prévention et de protection valorisées dans l'analyse détaillée des risques sont qualifiées par l'exploitant de Mesures de Maîtrise des Risques (MMR). Ces mesures sont clairement identifiées sur les nœuds-papillon et arbres d'événements du chapitre Analyse détaillée des risques. Elles feront l'objet d'un suivi régulier au travers de fiches de vie qui seront tenues à disposition de l'inspection des installations classées.

Concernant spécifiquement la maîtrise du risque d'explosion, le site est équipé d'un nombre important de détecteurs de gaz, localisés dans les zones confinées où des fuites d'hydrogène sont susceptibles de survenir (conteneurs compresseur et électrolyseur). En complément, les conteneurs de l'électrolyseur et des compresseurs sont équipés d'une ventilation mécanique forcée en fonctionnement permanent afin d'éviter l'accumulation d'hydrogène dans ces derniers.

Les installations du site Lhyfe de Bessières font l'objet d'une surveillance pour détecter les fuites qui pourraient survenir dans le cadre des opérations de maintenance préventive.

Relativement au risque d'incendie, la zone de production est séparée de la zone de chargement par un mur REI 120 et de 4m de hauteur. Cette mesure de protection permet d'isoler la zone des équipements de procédé de la zone de chargement pour éviter la propagation d'un incendie d'une zone à l'autre.

Le site est par ailleurs équipé de détecteurs d'incendie déclenchant un arrêt d'urgence, comme précisé au chapitre Protection incendie.

Enfin, afin de prévenir le risque de pollution des sols et de l'eau, le site est imperméabilisé et équipé d'un bassin de rétention permettant de récupérer les eaux incendie en cas d'accident.

8 EVALUATION PRELIMINAIRE DES RISQUES

L'analyse des risques a été réalisée par la société Lhyfe.

8.1 Rappel de la démarche

Cette étape de l'analyse des risques (après l'analyse de l'accidentologie et l'identification des potentiels de dangers y compris externes), se focalise sur l'analyse des risques internes, propres aux installations, ou analyse des dérives. Il s'agit d'une analyse systématique des risques. Elle vise à :

- Lister tous les Evènements Redoutés possibles ; pour les installations étudiées, les ERC type sont la perte de confinement ou la fuite de produit dangereux ou un départ de feu ;
- Identifier les causes (ou Evénements Initiateurs (EI)) et les conséquences (ou Phénomènes Dangereux (PhD)) de chacun des ERC envisagés ;
- Recenser les mesures de prévention, de détection et de protection ou limitation prévues ;
- Evaluer la gravité sur les tiers de chaque phénomène dangereux pour, in fine, identifier et retenir tous les phénomènes dangereux majeurs potentiels devant, de ce fait, être analysés et quantifiés dans le cadre de l'Analyse Détaillée des Risques (ADR). Les phénomènes dangereux majeurs potentiels sont tous les PhD susceptibles de conduire, directement ou par effet-domino, à des effets sur l'homme (irréversibles ou létaux) en dehors du site, sans tenir compte des éventuelles mesures de protection existantes sauf si celles-ci sont des barrières passives.

Le produit de sortie de l'APR est constitué de tableaux contenant a minima les colonnes suivantes :

- Evénements Redoutés (ou Evénements Redoutés Centraux) (ERC) ;
- Causes ou Evénements Initiateurs (EI) ;
- Conséquences / Phénomènes dangereux (PhD) ;
- Mesures de prévention ;
- Mesure de protection ou de limitation ;
- Gravité potentielle (évaluée en ne tenant compte que des éventuelles barrières passives) ;
- Commentaires ;
- Repère (= numéro de l'ERC utilisé dans la suite de l'EDD).

A ce stade de l'analyse des risques, une échelle simplifiée est utilisée pour caractériser la gravité des PhD identifiés :

	Effets limités au site	Effets à l'extérieur du site
Gravité	« Mineure »	« Grave »

Tableau 9. Echelle de gravité simplifiée

Pour évaluer la gravité des PhD, il peut être nécessaire, lorsque le Groupe de Travail n'a pas de notion de l'étendue des effets (absence de modélisations antérieures notamment), de réaliser une modélisation du phénomène dangereux concerné.

8.2 Evaluation Préliminaire des Risques liés aux installations

Les installations sont divisées en sous-systèmes, par fonction.

Puis, pour chaque bloc fonctionnel ou sous-système, l'analyse des risques consiste à :

- Définir les événements redoutés c'est-à-dire toutes les situations dangereuses susceptibles de survenir et d'avoir des effets sur l'environnement. D'une manière générale, les événements redoutés concernent la libération de potentiel de dangers telle que la fuite de gaz, l'éclatement de capacité etc ...
- Déterminer les causes ou événements initiateurs (d'origine interne ou externe au système, y compris les effets dominos) et conséquences (phénomène dangereux et effets). Une pré-analyse des causes externes d'origine naturelle ou non naturelle est réalisée aux paragraphes Identification des dangers liés à l'environnement naturel et Risques d'origine anthropique. L'identification des conséquences consiste à décrire le phénomène dangereux (explosion, feu de nappe, ...) et les effets associés (surpression, flux thermiques, ...) en faisant abstraction des barrières de sécurité ;
- Lister les barrières de prévention (réduisent la probabilité d'occurrence) et de protection, (limitent la gravité des conséquences) ;
- Identifier tous les phénomènes dangereux majeurs potentiels, c'est-à-dire dont les effets irréversibles voire létaux sortent des limites du site, quelle que soit leur probabilité d'occurrence, et sans tenir compte des mesures de maîtrise techniques actives (telles que la détection de fuite et la fermeture de vannes par exemple).

Pour rappel, à ce stade de l'analyse la gravité est évaluée de façon qualitative, à partir du jugement d'expert. Dès lors que des effets irréversibles à l'extérieur du site sont présumés, quelle que soit le nombre de personnes exposées, le phénomène dangereux est retenu pour être étudié dans l'Analyse Détaillée des Risques menée ultérieurement.

La synthèse de l'analyse est présentée sous forme de tableaux qui permettent :

- D'apprécier qualitativement et quantitativement les risques présentés par l'installation ;
- De mettre en évidence les mesures de prévention, de protection et d'intervention prises ou prévues ;
- D'identifier et de hiérarchiser les scénarios et les risques résiduels.

8.2.1 Découpage fonctionnel

Les installations du site Lhyfe de Bessières ont été découpées en sept unités fonctionnelles de la manière suivante :

Equipement	Description
Electrolyseur dans un conteneur	Il s'agit de la section du procédé qui est au cœur de la fabrication d'hydrogène (pression opératoire d'environ 40 barg)
Canalisations de transfert électrolyseur - compresseurs	Il s'agit de la section isolable de transfert d'hydrogène reliant l'électrolyseur aux compresseurs

Equipement	Description
Compresseurs d'hydrogène dans des containers	Composée de deux compresseurs alternatifs stockés dans des containers maritimes. Cette section fonctionne à haute pression (400 barg max.)
Canalisations de transfert compresseurs - Platine de chargement	Il s'agit de la section isolable de transfert d'hydrogène reliant les compresseurs à la platine de chargement
Flexible de chargement d'hydrogène	Les flexibles sont situés dans les loges de chargement et relient les platines de chargement et les tube trailers / conteneurs de gaz à éléments multiples
Stockage mobile d'hydrogène	Cette section comprend le stockage d'hydrogène sous forme de tube trailers / conteneurs de gaz à éléments multiples
Transformateur/redresseur	Le transformateur permet d'alimenter les installations après redressement et conversion de tension
Site (général)	Il s'agit du site dans son ensemble

Tableau 10. Sections étudiées

8.2.2 Analyse Préliminaire des risques (APR)

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
ELECTROLYSEUR DANS UN CONTENEUR							
Formation d'un mélange O ₂ /H ₂ explosif dans le séparateur de l'anode de l'électrolyseur	Dégradation de la membrane	Détecteur H ₂ dans la section anodique (dans le flux d'O ₂) : suivi de la concentration d'H ₂ dans le flux et arrêt de l'électrolyseur avec purge à l'azote sur l'atteinte d'une concentration volumique de 1%	Explosion interne dans section anodique (séparateur O ₂) : Effet de surpression	Le séparateur O ₂ (section anodique) est conforme à la norme NF EN14460 :2018 : appareil résistant à l'explosion – résistance à la surpression interne	Majeure	-	ER 1
Fuite de gaz sur le circuit H ₂ à l'intérieur du conteneur	Agression mécanique (intervention) Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiale et périodiques Compatibilité des matériaux choisis pour les équipements sous pression et les tuyauteries d'hydrogène Compatibilité des garnitures d'étanchéité Asservissement de sécurité de pression très haute Soupape de sécurité	Nuage d'hydrogène dans le container Jet enflammé, explosion d'une atmosphère gazeuse inflammable (VCE) Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels	Détection incendie (fumée) Alarme sonore et visuelle Système de ventilation artificielle Détection H ₂ engendrant l'arrêt et la dépressurisation de l'électrolyseur à 25% de la LIE Panneau du container de l'électrolyseur à résistance faible Détecteurs de gaz portatifs, EPIs	Majeur	Les effets thermiques d'un jet enflammé qui se produirait en cas d'inflammation immédiate ne seront pas étudiés car restreints à l'intérieur du conteneur	ER 2

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
Dégagement de gaz inflammable (H ₂) via l'évènement + Source d'inflammation	Coupure des installations, dépressurisation Arrêt d'urgence des installations Défaillance d'une ou plusieurs soupapes (ouverture intempestive) Ouverture intempestive d'une vanne de mise à l'évènement	Dimensionnement des événements Absence de source d'inflammation au niveau du débouché de l'évènement	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion d'une atmosphère gazeuse inflammable (UVCE/Flash-fire) Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels	Eloignement de la sortie d'évènement des limites de propriété du site Hauteur de l'évènement 8,5 m	Mineur		-
Formation d'une atmosphère explosible lié au dégagement d'hydrogène depuis la pile + Source d'inflammation	Raccordement électrique non protégés de la pile	Ventilation artificielle du volume englobant les piles de l'électrolyseur Arrêt de l'électrolyseur sur détection de débit bas de ventilation Détection d'hydrogène (25% de la LIE) menant à une coupure automatique des installations Contrôle des sources d'ignition: caractérisation de la zone à risque ATEX : Zone 2 EN à l'intérieur du volume englobant les piles de l'électrolyseur	Explosion d'une atmosphère dangereuse (VCE) à l'intérieur du volume englobant les piles de l'électrolyseur Endommagement majeur des équipements		Mineur	-	

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
CANALISATIONS DE TRANSFERT ELECTROLYSEUR - COMPRESSEURS							
<p>Fuite sur la canalisation d'hydrogène à 40 barg entre l'électrolyseur et les compresseurs</p>	<p>Agression mécanique Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne</p>	<p>Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiale et périodiques Compatibilité des matériaux choisis pour les équipements sous pression et les tuyauteries d'hydrogène Compatibilité des garnitures d'étanchéité Asservissement de sécurité de pression très haute Soupape de sécurité La canalisation passe principalement dans un caniveau et est protégée des impacts mécaniques</p>	<p>Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion (UVCE/Flash-fire) en cas d'inflammation du dégagement d'hydrogène Endommagement majeur d'équipements</p>	<p>Boutons d'arrêt d'urgence, alarme visuelle et sonore Détecteur de gaz portatif, permis de travail, EPIS</p>	<p>Majeur</p>	<p>-</p>	<p>ER 3</p>

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
COMPRESSEURS D'HYDROGENE DANS UN CONTENEUR							
Fuite de gaz sur le circuit H2 à l'intérieur du conteneur + Source d'inflammation	Agression mécanique (intervention) Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiale et périodiques Compatibilité des matériaux choisis pour les équipements sous pression et les tuyauteries d'hydrogène Compatibilité des garnitures d'étanchéité Asservissement de sécurité de pression très haute Soupape de sécurité + Contrôle des sources d'inflammation	Nuage d'hydrogène dans le conteneur du compresseur Jet enflammé, explosion d'une atmosphère gazeuse inflammable (VCE) Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels	Détection incendie (fumée) Alarme sonore et visuelle Système de ventilation artificielle Détection H ₂ engendrant l'arrêt et la dépressurisation du compresseur à 15% de la LIE	Majeur	-	ER 4
Dégagement de gaz inflammable (H ₂) via l'évènement + Source d'inflammation	Coupure des installations, dépressurisation Arrêt d'urgence des installations Défaillance ouverte d'une ou plusieurs soupapes Ouverture intempestive d'une vanne de mise à l'évènement	Contrôle des sources d'inflammation Rejet à l'atmosphère dans une zone sûre (étude de dispersion réalisée)	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion d'une atmosphère gazeuse inflammable (UVCE/Flash-fire) Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels	Eloignement de la sortie d'évènement des limites de propriété du site Hauteur de l'évènement 7 m	Mineur	-	-

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
Perte de confinement d'huile de lubrification d'un compresseur suite à une fuite	Corrosion externe/interne Perte d'étanchéité d'un raccord Agression mécanique/Choc	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) périodiques Permis de travail	Pollution	Rétention Kit environnemental anti-pollution	Mineur	-	-
CANALISATIONS DE TRANSFERT COMPRESSEURS - PLATINE PRINCIPALE							
Fuite sur la canalisation d'hydrogène entre les compresseurs et la platine principale de la station de remplissage des tubes trailers/CGEM ¹	Agression mécanique Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) périodiques La canalisation passe principalement dans un caniveau ou est à plus de 3 m de haut (protégée des impacts mécaniques)	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion (UVCE/Flash-fire) en cas d'inflammation du dégagement d'hydrogène Endommagement majeur d'équipements et des tubes trailers	Boutons d'arrêt d'urgence, alarme visuelle et sonore Murs coupe-feu entre les compresseurs et les loges de remplissages afin d'éviter les effets dominos	Majeur		ER 6

¹ Conteneurs à Gaz à Eléments Multiples

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
Eclatement de la capacité tampon haute pression	Agression thermique/ mécanique (intervention) Corrosion Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiale et périodiques Soupapes	Effet de surpression Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels		Majeur	-	ER 10
STOCKAGE MOBILE D'HYDROGENE (TUBE TRAILER OU CGEM)							
Fuite d'hydrogène au niveau d'un tube trailer + Source d'inflammation	Agression mécanique (intervention / manutention) Défaut soudure, défaut réservoir Surpression au remplissage	Epreuve des cylindres de stockage et des canalisations associées (équipements sous pression transportables) Contrôle de la pression au niveau du remplissage Asservissement de sécurité de pression très haute Soupape + Contrôle des sources d'ignition	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion (UVCE/Flash-fire) en cas d'inflammation du dégagement d'hydrogène Endommagement majeur des installations et effets dominos potentiels	Murs coupe-feu	Majeur	-	ER 8

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
Eclatement d'un cylindre de stockage d'hydrogène	Agression mécanique Effet domino : Feu torche / UVCE à proximité (flexible)	Murs coupe-feu des loges de remplissage, Structure «enveloppe» des conteneurs de gaz à éléments multiples Absence d'équipements au-dessus des loges de chargement Détection de fuite par chute de pression et arrêt du chargement Détection de flamme H2 et arrêt du chargement Limitation des sources d'agression thermique Contrôle des sources d'inflammation (contrôle de la température des éléments chauds de la remorque)	Effets de surpression		Majeur	-	ER 9
Fuite de gasoil/d'huile du camion pendant la livraison ou la récupération de la remorque	Perte d'étanchéité d'un raccord Agression mécanique/Choc	Formation des chauffeurs Vérification du bon état du véhicule en amont	Pollution des sols Incendie en cas d'inflammation de la nappe	Les eaux pluviales passent par un séparateurs hydrocarbures avant d'arriver dans le bassin eaux pluviales Kit environnemental anti-pollution Extincteurs adaptés	Mineur	Quantité de gasoil limitée, présence limitée (remorque dételée à la livraison).	-

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
LOGES DE REMPLISSAGE DES TUBES TRAILERS (PLATINE DE REMPLISSAGE)							
Fuite sur la canalisation d'hydrogène de la platine vers le remplissage des tubes trailers	Agression mécanique Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiaux et périodiques La canalisation est en hauteur (protégée des impacts mécaniques) Contrôle de la pression au niveau du remplissage Asservissement de sécurité de pression très haute Soupape	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion (UVCE/Flash-fire) en cas d'inflammation du dégagement d'hydrogène Endommagement majeur d'équipements et des tubes trailers	Détection de fuite par chute de pression déclenchant automatiquement un arrêt du remplissage Détecteur de flamme menant à un arrêt automatique des installations et à l'alimentation en gaz des installations Bouton d'arrêt d'urgence Murs coupe-feu Equipements adaptés vis-à-vis du risque ATEX et du type de zone dangereuse	Majeur	Modélisation analogue à la modélisation de fuite sur le réseau HP, en aval du compresseur.	ER 5

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
Fuite d'hydrogène au niveau du flexible de remplissage d'H ₂ , du dispositif de connexion au tube trailer + Source d'inflammation	Rupture, éclatement ou arrachage du flexible (mouvement du camion ...) Connexion défectueuse au niveau du camion Perte d'étanchéité d'un raccord Erreur humaine, choc	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) initiaux et périodiques Remplacement périodique des flexibles selon les préconisations des fournisseurs Procédure de chargement des tubes trailers (test de mise sous pression, mise à la terre) Remorque dételée avant le remplissage Break-away ou système de sécurité empêchant le déplacement de la remorque lors du remplissage + Contrôle des sources d'ignition + Contrôle de la température des éléments chauds de la remorque	Dégagement d'hydrogène à l'atmosphère Jet enflammé, explosion (UVCE/Flash-fire) en cas d'inflammation du dégagement d'hydrogène Endommagement majeur des installations, équipements et tubes trailers	Détection de fuite par chute de pression déclenchant automatiquement un arrêt du remplissage Décteur de flamme menant à un arrêt automatique des installations et à l'alimentation en gaz des installations Bouton d'arrêt d'urgence Murs coupe-feu Système anti-fouet	Majeur		ER 7
TRANSFORMATEUR / REDRESSEUR							
Incendie du transformateur	Perte de propriété diélectrique de l'huile Surtension	Capacité d'huile sur rétention	Pollution des sols Feu de nappe en cas d'inflammation Endommagement limité des équipements environnants	Détecteurs de fumée Kit environnement de déversement accidentel Permis de travail, EPIs	Mineur	-	-

Evènement redouté ERC	Causes (évènement initiateur)	Mesures de prévention	Conséquences : phénomène dangereux et effets	Mesures de protection et de limitation	Gravité potentielle dont effets dominos	Commentaires	N° repère ADR
SITE (GENERAL)							
Perte de confinement de gasoil du groupe électrogène	Agression mécanique Corrosion externe/interne Défaut soudure/défaut métallurgique Défaillance raccord Surpression interne	Procédures de maintenance des installations et contrôles (inspections) périodiques	Pollution des sols Feu de nappe en cas d'inflammation	Stockage des produits liquides inflammables sur des bacs de rétention Moyens de lutte incendie	Mineur	-	-

Tableau 11. Analyse préliminaire des risques

8.2.3 Scénarios sélectionnés pour l'ADR

Conformément à la méthodologie présentée, les scénarios retenus pour être étudiés en analyse détaillée des risques sont les suivants :

N°ER	Sections concernées	Description ER
1	Electrolyse	Explosion du séparateur de l'anode
2		Fuite d'H ₂ dans le container de l'électrolyseur H ₂
3		Fuite ou rupture sur circuit H ₂ en sortie de l'électrolyseur (hors container)
4	Compression	Fuite d'H ₂ dans le container des compresseurs
5		Fuite ou rupture sur circuit H ₂ sur rack au refoulement des compresseurs
6		Fuite ou rupture circuit H ₂ au refoulement des compresseurs
7	Loges de chargement	Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène
8		Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres
9		Eclatement d'une bouteille de stockage d'H ₂
10	Capacité tampon HP	Eclatement d'un cylindre de la capacité tampon HP

Tableau 12. Liste des ERC à étudier en détail

9 ANALYSE DÉTAILLÉE DES RISQUES

9.1 Préambule

L'Analyse Détaillée des Risques (ADR) a pour but d'évaluer la fréquence d'occurrence et les conséquences potentielles des événements retenus à l'issue de l'EPR. Cette évaluation des niveaux de probabilité et de gravité est réalisée selon les critères réglementaires définis dans l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005 *relatif à l'évaluation et la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les Etudes De Dangers des installations classées soumises à Autorisation*.

Dans le cas de l'installation Lhyfe de Bessières, seuls des effets thermiques et de surpression sont à envisager pour les phénomènes dangereux suivants :

- Jet enflammé ;
- Flash-fire ;
- Explosion en champ libre ou UVCE (pour Unconfined Vapour Cloud Explosion) ;
- Explosion confinée ;
- Eclatement de capacité.

Chacun de ces phénomènes dangereux fait l'objet d'une courte description phénoménologique dans le cadre du paragraphe 9.3 et les modèles physiques utilisés y sont également détaillés, ainsi que les principales hypothèses considérées pour leur modélisation.

Au préalable, le paragraphe 9.2 est consacré à la présentation de l'approche retenue pour déterminer les fréquences d'occurrence des événements étudiés et en déduire le niveau de probabilité de chaque phénomène dangereux.

9.2 Méthodologie de l'analyse probabiliste

Pour chaque événement redouté modélisé, une représentation schématique sous forme de nœuds papillon est réalisée.

Selon cette approche, les causes pouvant conduire à l'Évènement Redouté Central sont matérialisés dans un arbre des causes sur la partie gauche de chaque nœud papillon, tandis que les conséquences potentielles qui en découlent apparaissent sur la partie droite, également appelée « arbre d'évènement » ou « event tree ».

La logique de construction des nœuds papillon inclut :

- L'évaluation des fréquences de défaillances des équipements à partir de bases de données présentées ci-après ;
- L'identification des mesures de prévention et de protection/mitigation susceptibles de prévenir l'occurrence de l'ERC ou encore de limiter la gravité de ses conséquences potentielles ;
- La détermination des phénomènes dangereux pouvant conduire à un accident majeur sur le site.

9.2.1 Fréquence des pertes de confinement

Les Evènements Redoutés (ER) identifiés au chapitre 8 de la présente EDD pour le site de Lhyfe correspondent à la perte de confinement d'un gaz inflammable suivie ou non d'une inflammation, ou encore à l'éclatement d'une capacité sous pression avec propagation d'une onde de surpression aérienne dans l'environnement.

Les contributeurs potentiels de fuite sont les équipements ou les organes du procédé (capacités, tuyauteries, brides, etc.), dont les causes peuvent être diverses.

Dans le cadre de cette étude, les fréquences d'occurrence de fuite sur équipement ont été déterminées à partir de la base de données statistiques fournie par la méthodologie HYRAM dédiée à l'évaluation quantitative de la probabilité pour les équipements industriels véhiculant ou stockant de l'hydrogène.

Il apparaît en effet que cette base de données est particulièrement appropriée aux analyses de risques quantifiées des installations industrielles de production et de stockage d'hydrogène.

La publication scientifique présentant en détail la méthodologie HYRAM proposée pour les analyses de risques quantifiées (QRA) des systèmes « hydrogène », et sur laquelle repose l'estimation des fréquences de perte de confinement réalisée dans la présente étude, est fournie en Annexe 1.

Les fréquences de fuites ainsi utilisées dans le cadre de cette étude pour l'analyse probabiliste sont les suivantes :

Equipement	Taille de brèches				
	0,01%S	0,1%S	1%S	10%S	100%S
Tuyauteries (/m/an)	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Compresseur (/an)	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Flexible (/an)	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$

Tableau 13. Fréquences d'occurrence de fuite sur équipements (base de données HYRAM)

9.2.2 Probabilité d'inflammation

Certains phénomènes dangereux envisagés requièrent l'inflammation d'un mélange inflammable pour se produire. Dans un tel cas, la probabilité d'inflammation doit donc être intégrée au calcul de la fréquence d'occurrence du phénomène correspondant.

Les probabilités d'inflammation retenues dans cette étude sont les suivantes :

Probabilité	Type d'environnement	Probabilité d'inflammation immédiate	Probabilité d'inflammation retardée
Fuite $Q > 1 \text{ kg/s}$	Tous	0,9	0,1
Fuite $Q < 1 \text{ kg/s}$	Contrôle des sources d'inflammation	0,1	0,1
	Sources d'inflammation possibles, hors site, risque important de fuite impactante	0,1	0,9

Tableau 14. Probabilités d'inflammation retenues dans le cadre de l'étude

Ces probabilités d’inflammation sont en accord avec les valeurs proposées dans le rapport INERIS N° DRA-13-133211-12545A² pour les gaz hautement réactifs comme l’hydrogène. Dans une approche majorante, l’exploitant a choisi de dévier de cette publication pour le choix de la probabilité d’inflammation immédiate pour les fuites à débit élevé (0,9), permettant ainsi une représentativité des phénomènes dangereux à inflammation retardée, qui mènent aux conséquences les plus importantes.

Le site Lhyfe Bessières dispose d’un plan des zones ATEX, dont un extrait global est présenté ci-après :

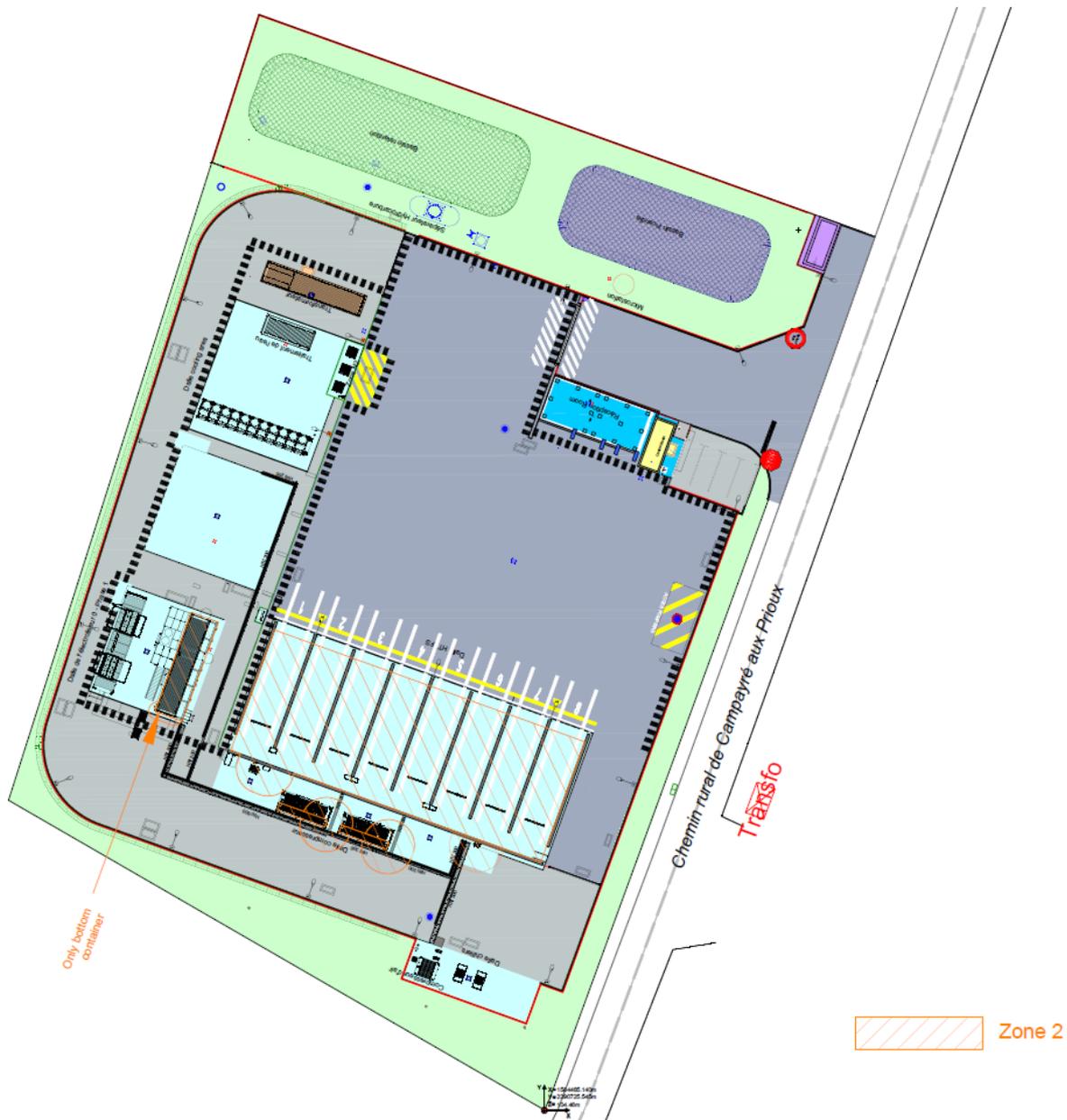


Figure 9. Plan zonage ATEX site Lhyfe Bessières

² DRA 71 - Opération B - Proposition d’une méthode semi-quantitative d’évaluation des probabilités d’inflammation, 22/06/2015

Les classes de probabilité suivantes sont considérées, selon l'annexe 1 de l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005 :

	E	D	C	B	A
Echelle qualitative	« Evènement possible mais extrêmement peu probable »	« Evènement très improbable »	« Evènement improbable »	« Evènement probable »	« Evènement courant »
	N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations	S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité	Un évènement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	S'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation	S'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives
Echelle semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 de l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005.				
Echelle quantitative		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Tableau 15. Annexe 1 de l'Arrêté du 29 septembre 2005

9.3 Etude des conséquences

9.3.1 Types d'effets à considérer

Les seuils d'effets à considérer lors de l'évaluation de l'intensité d'un phénomène dangereux sont les suivants :

- Le Seuil des Effets Irréversibles ou SEI, correspondant à l'apparition de blessures,
- Le Seuil des Effets Létaux ou SEL, correspondant à l'apparition d'effets létaux (taux de létalité de 1%),
- Le Seuil des Effets Létaux Significatifs ou SELS, correspondant à un taux de létalité de 5%.

Ces seuils sont définis dans l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005 *relatif à l'évaluation et la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les Etudes De Dangers des installations classées soumises à Autorisation.*

9.3.2 Présentation du logiciel PHAST

Pour évaluer l'intensité des conséquences potentielles des scénarios étudiés en détail, des modélisations numériques des phénomènes dangereux ont été réalisées. A cet effet, le logiciel PHAST, développé et distribué par DNV Technica, a été utilisé dans sa version 8.71.

Ce logiciel est largement reconnu dans la profession et a été évalué avec des conclusions positives par l'INERIS dans des versions antérieures (Références Ineris : EXP-Ymo-GMv-BCh/DG Z1/ 78 1310, 1991 "Evaluation de l'aptitude du logiciel PHAST à traiter des conséquences de mise à l'atmosphère de

produits inflammables et/ou toxiques", puis plus récemment sur les versions 6.0 et 6.1 INERIS DRA 2002-29276 novembre 2002).

Pour cette étude trois modèles spécifiques du logiciel PHAST ont été utilisés pour modéliser les conséquences des phénomènes dangereux :

- Le modèle « short pipe » pour les fuites sur canalisations,
- Le modèle « BLEVE Blast » pour les éclatements de capacités,
- Le sous-modèle « Multi-Energy Explosion » pour les explosions d'un nuage inflammable en champ libre.

Pour tous les phénomènes dangereux, les effets ont été évalués à une hauteur de 1,5m.

9.3.3 Evaluation du Terme Source

Pour chaque scénario de brèche conduisant à une fuite de produit à l'atmosphère, Le terme source a été déterminé à l'aide du logiciel PHAST à partir des conditions opératoires (pression et température de service, diamètre de ligne...), des propriétés physico-chimiques du produit (densité, température d'ébullition...).

En fonction de la localisation de la fuite au sein du procédé de fabrication, le débit total de fuite a été considéré comme limité par :

- En phase de dépressurisation : le débit calculé par PHAST en phase de dépressurisation d'un élément de stockage (capacité tampon HP, tuyauteries...),
- En phase de rejet alimenté : débit maximal d'hydrogène susceptible d'être produit par la réaction d'électrolyse.

Pour chaque modélisation, une vérification préalable avec le logiciel PHAST a permis de s'assurer que le débit limitant de l'électrolyse pouvait bien être atteint dans les conditions de la fuite considérée. Si le débit de fuite calculé par PHAST se trouve inférieur au débit limitant, c'est sa valeur qui est retenue.

9.3.4 Dispersion atmosphérique

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère.

L'émission d'un produit à l'atmosphère peut revêtir un caractère :

- Chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Les rejets sont les sous-produits indésirables de toute activité humaine, par exemple, les gaz d'échappement des voitures, les fumées d'usines, de chauffages urbains ou toute forme de pollution diffuse,
- Accidentel, avec des émissions à l'atmosphère ponctuelles dans le temps, non désirées comme la fuite d'une capacité ou un dégagement de fumées dû à un incendie.

Dans le cadre de la présente Analyse Détaillée des Risques, seuls les mécanismes de dispersion atmosphérique en situation accidentelle sont étudiés.

Le modèle utilisé pour la modélisation de la dispersion atmosphérique est l'« Unified Dispersion Model » (UDM) qui est au cœur du logiciel PHAST.

Il s'agit d'un modèle intégral. C'est-à-dire qu'il résout les équations de la mécanique des fluides, qui ont été « dégradées » par certaines corrélations empiriques issues de travaux expérimentaux. Il permet notamment de distinguer plusieurs étapes dans la dispersion :

- L'expansion, durant laquelle le jet passe des conditions à la brèche aux conditions atmosphériques lorsque l'écoulement est critique (i.e. pression supérieure à 1 atmosphère à la brèche),
- La phase d'entraînement, durant laquelle l'écoulement est perturbé par plusieurs phénomènes : effets de jet, effets de densité, interactions avec le sol... Cela se traduit par des effets de dilution plus ou moins importants et l'entraînement d'air correspondant dans le nuage,
- La dispersion passive, durant laquelle la dispersion du nuage est dominé par l'effet de dilution du vent.

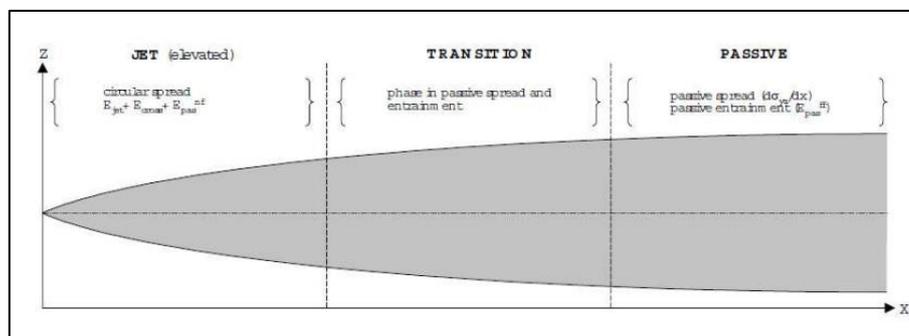


Figure 10. Schéma de principe des différentes phases de la dispersion atmosphérique d'un nuage inflammable n'impactant pas le sol

9.3.5 Phénomène de Flash-Fire

En cas d'inflammation d'un mélange inflammable, et si la combustion a lieu dans un environnement peu ou pas encombré, les effets thermiques sont prépondérants devant les éventuels effets de surpression.

La propagation de telles flammes à relativement faibles vitesses engendre des surpressions maximales de l'ordre de 2 kPa (20 mbar). Dans ces conditions, le terme explosion ou UVCE (Explosion de gaz en champ libre) n'a plus lieu d'être et c'est la dénomination « feux de nuage » ou encore « flash-fire ».

Il est important de garder à l'esprit que les séquences accidentelles conduisant à une explosion de gaz à l'air libre (UVCE) et à un flash-fire sont identiques. Seule la présence d'obstacle et/ou de confinement, susceptible d'accélérer la propagation des flammes et donc de modifier le régime de combustion, intervient dans la distinction entre les deux phénomènes.

Ainsi, on utilise le terme « flash-fire » pour décrire les effets thermiques d'une explosion de gaz à l'air libre, que les effets de surpression soient négligeables ou non.

Les effets thermiques susceptibles de générer des blessures sont ceux dus au rayonnement. Il convient toutefois de noter que des effets thermiques significatifs peuvent d'être ressentis dans toutes les parties de l'espace susceptibles d'être occupées par les gaz brûlés.

Comme défini dans la circulaire du 10 mai 2010 *récapitulant les règles méthodologiques applicables aux Etudes De Dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003*, les distances relatives aux effets thermiques du flash-fire sont donc déterminées à partir de la distance à la LIE comme suit :

- $d_{SEL} = d_{SELS} = d_{LIE}$
- $d_{SEI} = 1.1 d_{LIE}$

9.3.6 Phénomène d'UVCE

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre constituent un des événements les plus redoutés dans le domaine des risques industriels. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes suivantes :

- Rejet dans l'atmosphère d'un produit inflammable, en phase gazeuse ou liquide,
- Création puis dispersion d'un mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- Inflammation du volume inflammable,
- Propagation d'un front de flamme au travers du nuage inflammable. Ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés. Dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de degrés et jusqu'à 2000 °C environ,
- Le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Selon les caractéristiques du nuage inflammable (richesse, réactivité du combustible, etc...) et celles de son environnement (présence d'obstacles, confinement, etc...), différents régimes d'explosion sont envisageables, correspondant à différentes vitesses de combustion :

- La déflagration est le mode de propagation de la flamme le plus courant dans les explosions accidentelles de gaz ou vapeurs dans l'industrie en général. Elle est définie comme une combustion où le front de flammes sphérique divergent parcourt la charge combustible avec une célérité spatiale subsonique par rapport au milieu situé immédiatement en amont de l'onde de combustion,
- La détonation se caractérise par le fait qu'une fois initiée, la combustion maintient sa vitesse sans besoin d'obstacles. Le front de réaction est propagé par une onde de choc qui comprime le mélange au-delà de sa température d'auto-inflammation. En même temps, le choc est maintenu par la chaleur dégagée de la réaction de combustion : il s'agit donc d'une réaction de combustion auto-entretenue. La détonation nécessite un amorçage à fort apport d'énergie comme celui d'une charge d'explosif condensé. La propagation de la détonation résulte alors du couplage de la zone de réaction et d'un front de choc.

La modélisation du phénomène d'UVCE se divise en deux étapes :

- La détermination de la masse inflammable maximale atteinte au cours de la dispersion ;
- L'évaluation des effets de surpression consécutifs à l'explosion de cette masse inflammable dans le volume encombré considéré.

Evaluation de la masse inflammable :

On détermine la masse inflammable maximale atteinte au cours de la dispersion avec le même terme source que pour l'évaluation des effets thermiques du flash-fire. Cette approche est cohérente dans la mesure où la séquence accidentelle menant aux phénomènes dangereux flash-fire et VCE est la même.

Dans une approche majorante, c'est le volume inflammable maximale atteint lors de la phase de dispersion qui a été considéré pour évaluer la masse inflammable susceptible de participer à l'explosion.

Le phénomène d'UVCE n'est toutefois pas modélisé pour de trop faibles masses inflammables. En effet, en-dessous d'un certain seuil critique, les effets de surpression correspondant à l'explosion restent à l'intérieur du volume encombré considéré. Dans le cas de l'installation Lhyfe de Bessières, il a été considéré que des valeurs de l'ordre de quelques grammes d'hydrogène dans le volume inflammable n'étaient pas susceptibles de conduire à des effets de surpression significatifs.

Détermination des effets de surpression :

La détermination des effets de surpression se fait selon la méthode Multi-Energie, développée par Van den Berg et décrite en détail dans le TNO « Yellow Book » (CPR 14E -1997).

Le principe est d'accumuler la masse participante évaporée dans l'environnement encombré de l'unité impliquée. La méthode Multi-Energie suppose un panache hémisphérique de concentration stœchiométriques et de volume égal à la zone encombrée recouverte par le panache.

Les paramètres d'effet de surpression sont calculés en utilisant un modèle unidimensionnel à vitesse de flamme constante, basé sur l'intégration numérique des équations d'écoulement compressible.

Chaque zone encombrée susceptible de conduire à une explosion est ainsi caractérisée par une onde de pression à laquelle est associé un indice de sévérité gradué de 1 à 10.

L'indice de sévérité d'explosion varie généralement entre 3 et 4 pour une explosion en champ libre ou dans une zone très peu encombrée, et entre 5 et 7 à l'intérieur d'une unité de production industrielle. Un incrément peut éventuellement être considéré pour tenir compte de la forte réactivité de certains produits lorsqu'ils sont en proportion significative (hydrogène, éthylène...).

Les critères de sélection de l'indice de sévérité d'explosion sont définis selon la méthodologie proposée par Kinsella (1993) :

- L'énergie de la source d'inflammation, qui peut être forte dans le cas de la foudre ou d'une explosion primaire ou faible dans le cas d'étincelles par exemple,
- Le degré d'encombrement de la zone (présence d'obstacles susceptibles de générer des turbulences et d'accélérer ainsi le front de flamme),
- Le degré de confinement de la zone (présence de plans solides (murs, sol, etc...) s'opposant à la propagation de l'onde de pression dans une ou plusieurs directions).

Le tableau de la page suivante, issu du « TNO Yellow Book » permet de définir l'indice de sévérité d'explosion en fonction de ces trois critères.

Catégorie de la force d'explosion	Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
	Faible	Forte	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
1		X	X			X		7 – 10
2		X	X				X	7 – 10
3	X		X			X		5 – 7
4		X		X		X		5 – 7
5		X		X			X	4 – 6
6		X			X	X		4 – 6
7	X		X				X	4 – 5
8		X			X		X	4 – 5
9	X			X		X		3 – 5
10	X			X			X	2 – 3
11	X				X	X		1 – 2
12	X				X		X	1

Tableau 16. Critères de choix de l'indice Multi-Energie selon Kinsella

Dans cette étude, un indice de sévérité de 10 a ainsi été considéré pour une explosion d'hydrogène prenant son origine dans un container, en retenant une faible énergie d'inflammation, un taux d'encombrement modéré, tout en tenant compte de la forte réactivité du produit.

Dans le cas d'une explosion d'hydrogène en champ libre, l'indice de sévérité utilisé est 5, en retenant la valeur majorante de 4 des explosions en champs libre fournie dans la Fiche n°2 de la Circulaire du 10 mai 2010, tout en considérant un incrément de 1 pour tenir compte de la forte réactivité du produit.

Le module « Multi-Energie » implémenté dans le logiciel PHAST a été utilisé pour évaluer les effets de surpression en champ libre selon cette méthode.

9.3.7 Phénomène de Jet Enflammé

Selon l'INERIS, « Le feu torche [ou jet enflammé] prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion [...] lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme par l'intermédiaire d'une source d'inflammation quelconque ».

Une flamme de diffusion est caractérisée par le fait que l'air et le combustible sont initialement séparés et que la combustion se produit dans la zone où le mélange comburant-combustible se fait, générant ainsi une zone trop riche en combustible « précédant » la flamme.

On trouve aussi cette autre définition dans les rapports du UK HSE : « A jet fire is a turbulent diffusion flame resulting from the combustion of a fuel continuously released with some significant momentum in a particular range of direction ».

De façon générale, on retient qu'une pression minimale de l'ordre de 2 bar(abs) est nécessaire pour l'établissement et le maintien dans le temps d'un jet enflammé. Ce phénomène dangereux n'est donc pas retenu dans le cadre de l'Analyse Détaillée des Risques pour des équipements présentant une pression de service inférieure à 2 bar(abs).

Plusieurs paramètres influent sur les caractéristiques du jet enflammé :

- Le produit considéré,
- La taille de brèche et le terme source associé, dépendant des conditions en amont de la brèche (T, P...),
- La vitesse de jet caractérisant le régime d'écoulement,
- La direction du jet et la présence éventuelle d'obstacles.

L'approche retenue dans le cadre de cette étude pour la modélisation du phénomène de jet enflammé est l'utilisation du modèle implémenté dans le logiciel PHAST.

9.3.8 Phénomène d'éclatement de capacité

La rupture catastrophique d'une capacité correspond à la ruine de l'enveloppe conduisant au relâchement instantané de la totalité de l'inventaire de la capacité. Dans un tel cas, le relâchement brutal d'énergie consécutif à la rupture d'une capacité sous pression ou d'un réservoir, engendre des ondes de pression et génère des fragments animés de vitesses élevées, pouvant causer des dommages aux personnes et des dégâts aux biens.

Un éclatement d'une capacité sous pression ou d'un réservoir peut être le fait de différents phénomènes physiques :

- Réaction d'emballement de réaction ou de combustion interne : on parle alors d'explosion confinée ;
- Montée en pression d'une capacité soumise à un incendie voisin (cas feu) : on parle alors d'explosion physique (pas de combustion interne) ;
- Eclatement pneumatique d'une capacité suite à l'envoi de gaz sous pression ;
- Sur-remplissage liquide d'une capacité (éclatement hydraulique) ;
- Eclatement d'une capacité « à froid » suite à un choc thermique (détente cryogénique par exemple) ou à un impact : on parle dans ce cas de rupture fragile ;
- Inflammation d'un mélange de vapeurs dans ses limites d'inflammabilité : on parlera d'explosion thermique ; c'est le cas notamment de l'explosion des réservoirs de stockage atmosphérique.

Ces différents modes de rupture correspondent à des conditions de rupture spécifiques qui dépendent fortement de la séquence accidentelle considérée. La modélisation des effets a été adaptée en fonction de la pression de rupture tel que définie pour chaque scénario.

9.3.9 Phénomène d'explosion confinée

Le phénomène d'explosion confinée a lieu lorsqu'une fuite de gaz survient dans un espace confiné ou semi-confiné qui aboutit à la formation dans l'enceinte d'un mélange combustible réactif-air. Lorsqu'une source d'inflammation adéquate est présente à l'intérieur de la zone inflammable du nuage.

Le chapitre 7 : Rupture of Vessels du « Yellow Book » du TNO propose différentes modélisations de ce dernier phénomène.

La première étape de la méthodologie consiste à évaluer l'énergie disponible avant éclatement de l'enceinte. Cette énergie représente l'augmentation de l'énergie interne de l'enceinte produite par l'accroissement de la pression dans le ciel gazeux. Elle peut être estimée à l'aide de l'équation de Brode simplifiée (en Joules) : $E = 3 \times V \times (P_{ex} - P_{atmosphérique})$

Avec :

- V : Volume de l'enceinte considérée en m^3 ,
- $P_{ex} - P_{atmosphérique}$ = Pression relative de l'explosion en Pa,
- P_{ex} : pression absolue de l'explosion.

Dans une approche dimensionnante, il est retenu comme pression relative $P_{ex} - P_{atmosphérique}$ de l'explosion : $P_{ex} - P_{atm} = 2 * P_{rupture}$ (où $P_{rupture}$ est la pression statique de rupture de l'enceinte). À noter que 2 constitue un coefficient d'amplification afin de prendre en compte le développement de l'explosion.

La détermination des distances des effets de surpression s'effectue en appliquant la méthode multi-énergie indice 10, qui peut être majorante dans certains cas. Cette formule, respectant la physique du phénomène, donne les surpressions d'une onde de choc résultant d'un éclatement, en fonction de l'énergie d'explosion définie à l'étape précédente.

Le tableau suivant donne les formules associées aux effets de surpression :

Valeurs de références relatives aux effets de surpression	Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10 ⁴
300 mbar	0,028 E ^{1/3}
200 mbar	0,032 E ^{1/3}
140 mbar	0,05 E ^{1/3}
50 mbar	0,11 E ^{1/3}

Pour le seuil des 20 mbar, il est admis que la distance d'effet est égale à deux fois la distance d'effets obtenue pour une surpression de 50 mbar. (Source : Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des IC).

9.3.10 Conditions météorologiques

La fiche n°2 de la Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux Etudes De Dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juin 2003, préconise deux conditions météorologiques standards à retenir pour la modélisation de phénomènes dangereux de dispersion atmosphérique :

	Conditions	
	3F	5D
Vitesse du vent	3 m/s	5 m/s
Stabilité Pasquill	F	D
Atmosphère	Stable	Neutre
Température ambiante	15 °C	20 °C
Température du sol	15 °C	20 °C
Humidité	70%	70%

Tableau 17. Conditions météorologiques standards utilisées

9.3.11 Enjeux externes à proximité du site

Le niveau de gravité des Evènements Redoutés est évalué pour chaque phénomène dangereux en fonction des enjeux exposés aux conséquences des accidents potentiels sur les installations du site Lhyfe de Bessières, à l'extérieur de ses limites de propriétés, telles que représentées sur la figure suivante.

Pour déterminer le nombre de personnes potentiellement exposées à ces conséquences, une cartographie des enjeux a été réalisée à selon les principes édictés dans la fiche n°1 de la Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux Etudes De Dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juin 2003.

Les deux enjeux les plus importants et situés à proximité immédiate du site Lhyfe de Bessières sont :

- Le chemin des prieurs à l'est du site,
- Le futur site SOLVALOR à l'ouest du site,

Par ailleurs, d'autres enjeux, situés à plus de 20m des limites de propriétés, sont répertoriés : il s'agit de deux industries situées à l'est du site.

Les enjeux sont matérialisés sur la cartographie des enjeux suivante :

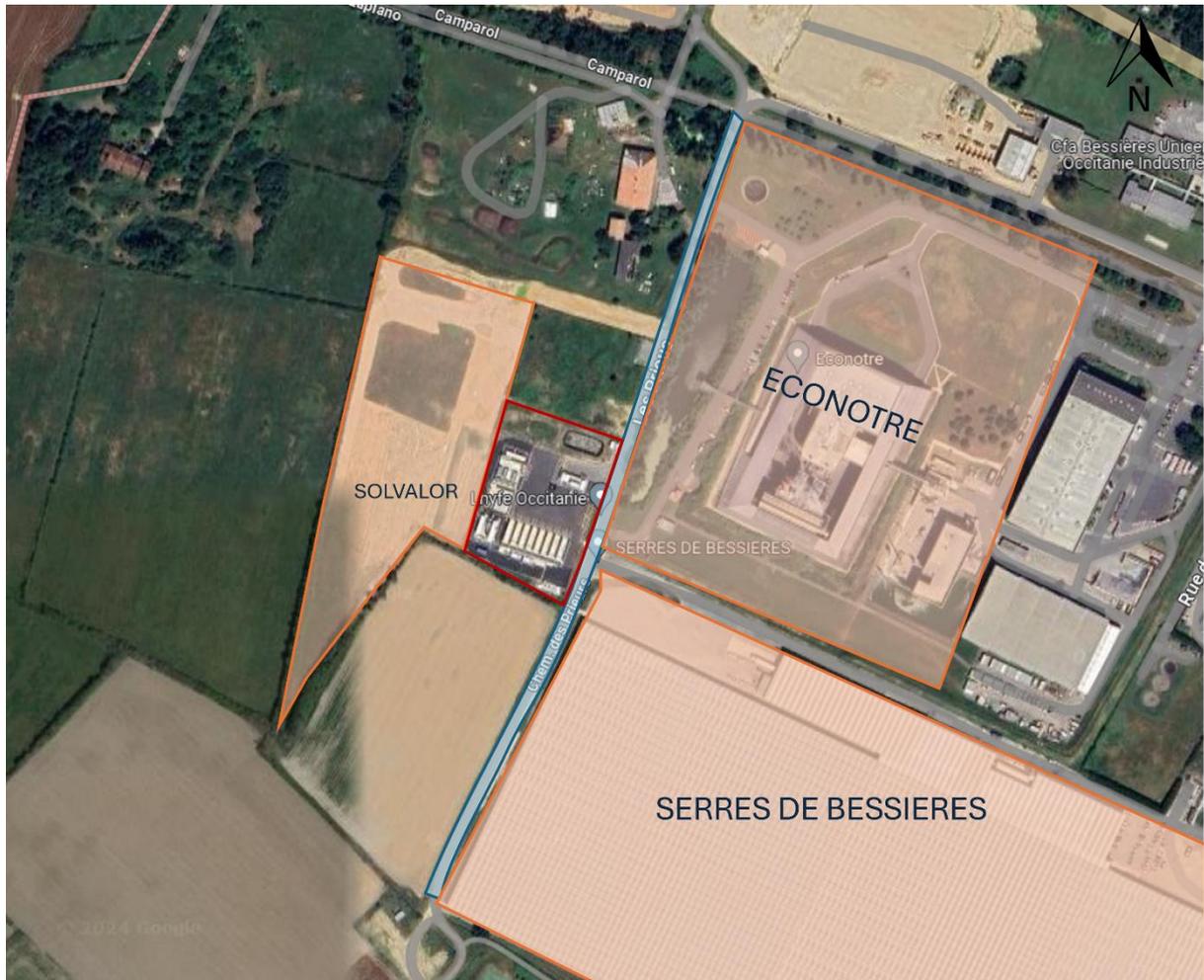


Figure 11. Enjeux à proximité du site

Pour déterminer le nombre de personnes exposées à ces conséquences, une cartographie des cibles a été réalisée à l'aide :

- Des données recueillies dans les établissements proches susceptibles d'être touchés par les effets d'accidents potentiels ;
- De la fiche n°1 de la Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux Etudes De Dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juin 2003.

Les enjeux pris en compte dans le calcul de gravité sont présentés ci-dessous :

Nom	Distance minimale au site Lhyfe	Orientation	Type d'enjeux	Population estimée
SOLVALOR	Proximité immédiate	Ouest	ICPE	15 personnes
Champ	Proximité immédiate	Sud	Terrain non aménagé	1 personne/100 ha
Econotre	55 m	Est	ICPE	10 personnes
Serres de Bessières	25 m	Est	Entreprise	85 personnes
Chemin des prieurs ³	Proximité immédiate	Est	Voie de circulation	215 personnes

³ Le trafic sur le chemin des prieurs a été estimé égal à la somme de la population maximale estimée pour les Serres de Bessières, Econotre et Lhyfe (visiteurs inclus), et de cent personnes supplémentaires liées à d'autres usages.

9.4 Analyse détaillée des risques des scénarios retenus

Les scénarios retenus à l'issue de l'EPR sont au nombre de dix. Ils sont analysés en détail dans les paragraphes suivants, en termes d'intensité, de gravité et de probabilité.

Les cartographies des effets correspondantes de chaque scénario sont proposées en Annexe 3 dans le but de mettre en évidence les enjeux potentiellement impactés.

Une cartographie enveloppe des dangers a également été réalisée pour chaque type d'effets (thermique ou de surpression).

9.4.1 ER 1 : Eclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur

Le séparateur de l'anode de l'électrolyseur est une capacité de 7,3 m³ recueillant l'oxygène issu du procédé de l'électrolyseur. En cas de dégradation d'une membrane, l'hydrogène produit dans l'électrolyseur à 40 barg est susceptible de s'accumuler dans le séparateur de l'anode opéré à plus basse pression (0,9 barg). Un mélange explosif entre l'oxygène et l'hydrogène est alors susceptible de se former, pouvant donner lieu à une explosion interne en cas d'inflammation de ce mélange, puis à une rupture du séparateur de l'anode s'accompagnant d'effets de surpression.

Intensité et gravité :

Le scénario modélisé est l'éclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur à la suite d'une explosion interne d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

La pression de calcul du séparateur est de 4 barg.

Les effets de surpression induits par l'explosion ont été évalués selon la méthode Brode/Multi-énergie avec un indice 10, en considérant de manière conservatrice une propagation de l'onde de pression en champ libre alors que le séparateur de l'électrolyseur est localisé à l'intérieur du conteneur abritant les équipements de procédé de l'électrolyseur.

Lorsque l'éclatement d'une capacité est provoqué par une explosion interne, la pression de rupture peut être prise égale au double de la pression de rupture statique, elle-même prise égale à 2,5 fois la pression de calcul de la capacité⁴. Dans le cas du séparateur de l'anode de l'électrolyseur, cela aboutit à une pression de rupture finale de 20 barg.

Les distances d'effets de surpression obtenues sont les suivantes :

VCE	SELS	SEL	SEI	SBV
	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Séparateur anode	11 m	17 m	36 m	72 m
Enjeux impactés	Interne	Externe	Externe	Externe
	-	SOLVALOR S _{impactée} : 100 m ² 0,1 personne	SOLVALOR : S _{impactée} 3 000 m ² – 3 personnes Champ S _{impactée} : 1 380 m ² 0,1 personne	- -

Tableau 18. Distances d'effets de surpression ER 1

⁴ Le guide OMEGA 15 de l'INERIS recommande, lorsque l'éclatement est provoqué par une explosion interne de retenir une pression de rupture égale au double de la pression de rupture en statique, à condition que cette valeur n'excède pas la pression maximale d'explosion théorique. De plus, le guide préconise de retenir en régime statique un rapport de 2,5 entre la surpression de ruine et la pression de calcul effective.

La cartographie des distances d'effets associées à l'éclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur est disponible en Annexe 3.

Les seuils SEI et SEL atteignent un enjeu externe au site. Il s'agit d'une zone de biotraitement des déchets de terre au sein de l'entreprise Solvalor, sans présence humaine en fonctionnement normal. Néanmoins, dans une approche majorante, les cibles présentes dans la zone sont prises en compte dans le calcul de la gravité, considérant l'effectif de l'entreprise Solvalor au prorata de la surface touchée.

Le niveau de gravité correspondant est de **2 - Sérieux** (zone SEL avec « Au plus 1 personne touchée »).

Probabilité :

Aucune donnée correspondant à une explosion de séparateur anode de ce type d'électrolyseur n'apparaît dans les bases de données citées en début de chapitre (HYRAM). La fréquence de l'évènement redouté a par conséquent été évaluée sur la base des fréquences d'occurrence des causes et des probabilités de défaillance des barrières mises en œuvre sur le site Lhyfe de Bessières (cf. Figure 12).

La fréquence d'occurrence des causes retenues pouvant conduire à l'évènement redouté est déterminée par des valeurs conservatives généralement utilisées en première approche dans une Analyse Détaillée des Risques.

Une probabilité d'inflammation de 0,1 a été considérée en vertu de :

- La mise à la terre des structures métalliques au système de liaison équipotentielle du site (séparateur de l'anode, tuyauteries métalliques) prévenant l'accumulation de charges électrostatiques ;
- L'absence de source d'inflammation générée par l'instrumentation liée au séparateur de l'anode, justifiée dans le cadre de la conformité de l'électrolyseur à la directive « Machines » 2006/42/CE.

De plus, la section anodique de l'électrolyseur, dont fait partie le séparateur de l'anode, a été conçue selon la norme EN 14460 :2018⁵ pour résister et contenir une explosion interne. La déclaration de conformité de l'électrolyseur fournie en annexe 2, atteste cette conception. En accord avec l'évaluation du niveau de confiance forfaitaire proposé dans la publication Omega 10⁶ de l'INERIS pour les dispositifs passifs, un niveau de confiance 2 est retenu pour cette conception permettant au séparateur de l'anode de résister à l'explosion.

⁵ EN 14460 :2018 Appareil résistant à l'explosion

⁶ Rapport d'étude n° DRA-17-164432-10199B – Evaluation de la performance des barrières techniques de sécurité, Omega 10, 23/05/2018

D'après l'analyse des risques menée en interne, le nœud papillon de l'évènement redouté de l'explosion du séparateur anode est le suivant :

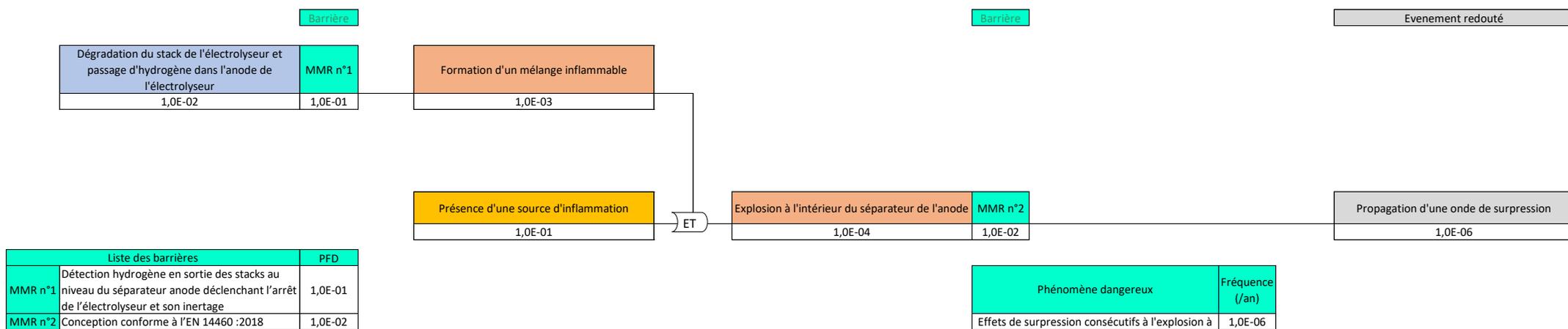


Figure 12. Nœud papillon ER 1 - Explosion séparateur anode

La fréquence du scénario correspond ainsi à un niveau de probabilité de E.

Le risque correspondant à l'ER 1 est évalué de la façon suivante :

ER 1	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
Eclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur	E	Sérieux	Acceptable

9.4.2 ER 2 : Fuite d'H₂ dans le conteneur de l'électrolyseur

Les équipements de procédé de l'électrolyseur sont abrités dans un conteneur d'un volume total de 122 m³. Pour rappel, l'hydrogène est produit au sein de l'électrolyseur à une pression opératoire de 40 barg. En cas de fuite sur un équipement contenant de l'hydrogène sous pression, celui-ci peut s'accumuler à l'intérieur du conteneur. En cas d'inflammation retardée du volume d'hydrogène accumulé, une explosion confinée est susceptible de se produire.

Les mesures de maîtrise du risque relatifs à ce scénario sont la ventilation artificielle du conteneur, en fonctionnement permanent, ainsi que la détection fixe d'hydrogène au sein du conteneur (en partie haute du conteneur, et dans la cheminée d'évacuation de la ventilation), qui déclenche un arrêt d'urgence de l'électrolyseur induisant sa dépressurisation et purge à l'azote.

Il convient de noter que les effets thermiques d'un jet enflammé qui se produirait en cas d'inflammation immédiate ne sont pas étudiés car supposés restreints à l'intérieur du conteneur (parois non propagatrices des incendies de courte durée, détecteurs d'incendie déclenchant un arrêt d'urgence général du site).

Intensité et gravité :

Il est considéré la formation d'une ATEX à la stœchiométrie d'un mélange d'air et d'hydrogène dans le conteneur, suite à une fuite sur le circuit.

Le volume du conteneur est de 122 m³. Un taux d'encombrement de 30 % est considéré à l'intérieur du conteneur, le volume disponible pour le mélange inflammable est donc estimé à 86 m³. En l'absence de données précises, la pression de ruine du conteneur est prise égale à 500 mbar.

Les distances d'effets de surpression obtenues sont les suivantes :

VCE	SELS	SEL	SEI	SBV
	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Conteneur électrolyseur	7 m	11 m	24 m	48 m
Enjeux impactés	Interne		Externe	-
	-		SOLVALOR :	-
			S _{impactée} 700 m ² – 0,7 personne	-
-		Champ :	-	
		S _{impactée} 1 500 m ² - 0,1 personne	-	

Tableau 19. Distances d'effets de surpression ER 2

La cartographie des distances d'effets est disponible en Annexe 3.

Les seuils SEI et SELS atteignent un enjeu externe au site. Il s'agit d'une zone de biotraitement des déchets de terre sans présence humaine en fonctionnement normal. Néanmoins, dans une approche majorante, les cibles présentes dans la zone sont prises en compte dans le calcul de la gravité, au prorata de la surface touchée.

Le niveau de gravité correspondant est de **1 - Modéré** (zone SEI avec « Au plus 1 personne touchée »).

Probabilité :

En préambule de l'évaluation de la probabilité pour cet événement redouté, il convient de justifier la gamme de taille de fuite prise en compte.

En cas de fuite d'hydrogène dans le conteneur, la ventilation permet d'évacuer en partie l'hydrogène accumulé. La concentration d'hydrogène dans le conteneur augmente jusqu'à atteindre une concentration d'équilibre. La quantité d'hydrogène rejeté par la ventilation est alors égale à la quantité apportée par la fuite. La concentration d'équilibre peut être calculée avec la formule suivante :

$$C_{eq} = \frac{Q_{in}}{Q_{out}}$$

où :

- Q_{in} est le débit volumique de fuite d'hydrogène en m³/s ;
- Q_{out} est le débit volumique de ventilation en m³/s.

Le débit volumique minimal de la ventilation du conteneur de l'électrolyseur est 1 027 m³/h soit 0,29 m³/s. Il peut en être déduit que les fuites de débit massique inférieur à 9,13.10⁻⁴ kg/s ne généreront pas de concentration en hydrogène dans le conteneur supérieure à la LIE (4% de concentration volumique). Ce débit correspond à une section de fuite comprise entre 0,01% et 0,1 % de la section de passage des tuyauteries présentes à l'intérieur du conteneur de l'électrolyseur (d'un diamètre interne de 50 mm). Par conséquent, la contribution des fuites de taille inférieure à 0,01 % de la section de passage est exclue du calcul.

Il est considéré que la détection fixe d'hydrogène qui équipe le conteneur de l'électrolyseur et déclenche un arrêt d'urgence de l'électrolyseur en cas de détection d'une concentration d'hydrogène supérieure à 25% de la LIE soit 1% de concentration volumique permet d'empêcher l'événement redouté pour les fuites de taille inférieure à 10% de la section de canalisation.

Cet évènement est susceptible de se produire sur une canalisation en DN50 dont la longueur a été estimée à 50m.

Le calcul de la probabilité annuelle d'occurrence d'une petite fuite à l'intérieur du conteneur de procédé de l'électrolyseur donne ainsi :

$$F = (50 * (3,7 * 10^{-6} + 9,6 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7})) = 2,6 * 10^{-4}$$

Pour rappel, la contribution des fuites de taille inférieure à 0,01 % de la section de passage est exclue du calcul.

Le calcul de la probabilité annuelle d'occurrence d'une fuite majeure à l'intérieur du conteneur de procédé de l'électrolyseur donne ainsi :

$$F = (50 * 1,5 * 10^{-7}) = 7,5 * 10^{-6}$$

Par ailleurs, la probabilité d'inflammation est intégrée au calcul probabiliste. La canalisation concernée est située en zone ATEX, puisque le volume dans lequel l'hydrogène peut s'accumuler est classé zone ATEX 2. La probabilité totale d'inflammation retardée retenue est de 0,1.

La fréquence d’occurrence du scénario est calculée au moyen du nœud papillon ci-dessous :

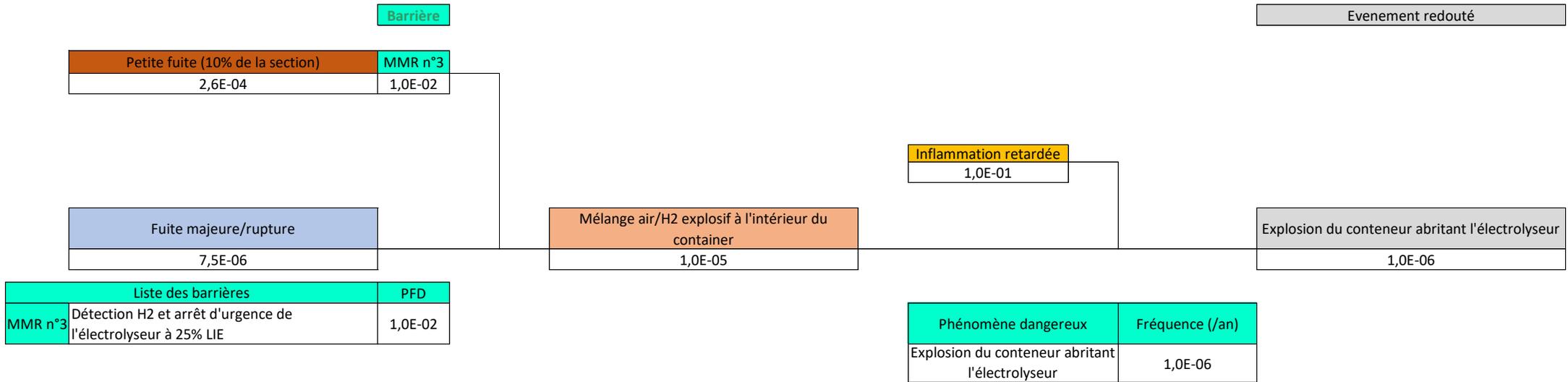


Figure 13. Nœud papillon ER 2- Fuite d’H2 dans le conteneur de l’électrolyseur

La fréquence du scénario correspond ainsi à un niveau de probabilité de E.

Le risque correspondant à l'ER 2 est évalué de la façon suivante :

ER 2	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
VCE	E	Modéré	Acceptable

9.4.3 ER 3 : Fuite ou rupture sur circuit H₂ en sortie de l'électrolyseur (hors container)

A la sortie de l'électrolyseur, l'hydrogène produit à 40 barg chemine en canalisation jusqu'aux compresseurs. La majeure partie de cette canalisation est installée en caniveau mais comporte des portions aériennes en sortie de l'électrolyseur et à l'entrée des compresseurs.

Deux sous-scénarios ont été pris en compte dans le cadre de cette étude :

- Scénario de fuite d'une taille équivalente à 10% de la section de la tuyauterie (ER3A),
- Scénario de rupture de tuyauterie (ER3B).

Intensité et gravité :

Les distances d'effets potentielles de cet évènement sont modélisées avec le modèle « SHORT PIPE » de PHAST.

Dans une approche conservative, seule la direction de rejet horizontale est présentée dans la suite de l'étude. Les distances d'effets ont néanmoins été vérifiées pour une direction de rejet verticale (seule direction considérée pour les fuites sur la portion en caniveau de la tuyauterie) : aucun effet thermique ou de surpression n'est susceptible de dépasser les limites de propriété.

Les données d'entrées suivantes ont été prises en compte :

Pression de service	40 barg
Température de service	30 °C
Débit de production	0,025 kg/s
Direction de fuite	Horizontale
Hauteur de fuite	1,5 m
DN	100

Tableau 20. Données d'entrée ER 3

9.4.3.1 ER 3 A : Petite fuite sur circuit H₂ en sortie de l'électrolyseur

Deux phases sont distinguées dans le cas d'une fuite de 10% de la section de la tuyauterie :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par l'inventaire statique d'hydrogène dans l'électrolyseur et la tuyauterie,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de production de l'électrolyseur.

Phase	1	2
Inventaire	650l	Illimité
Débit de fuite	1,14 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	2,3 s	3600s

Tableau 21. Données d'entrée ER 3 A

D'après le rapport d'étude de l'INERIS N° DRA-14-133133-02917A, pour un rejet de courte durée (<3s), la flamme du phénomène de jet enflammé n'a pas le temps de s'établir et la dose reçue est considérée nulle. Ainsi, aucun effet thermique lié au jet enflammé n'est considéré pour la phase 1 du rejet.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	-	NA
	Phase 2	4,8	5,0	5,2	-	4,6
UVCE		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	NA	< 1kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Phase 1	Distances d'effet (m)	23,6	28,1	30,9 m		
	Distances d'effet maximale (m)	23,6 à h=1,8 m	28,5 à h=2,0 m			
Phase 2	Distances d'effet (m)	4,9	4,7	5,4 m		
	Distances d'effet maximale (m)	5 à h=1,7m	4,8 à h=1,6m			

Le phénomène d'UVCE n'est pas considéré comme crédible pour ce scénario, la masse inflammable obtenue étant de l'ordre de quelques grammes. Sa combustion ne génère pas d'effets de surpression significatifs.

Les effets du flash-fire en phase 1 sont de l'ordre de 28 m au maximum comme représentés sur la figure suivante :

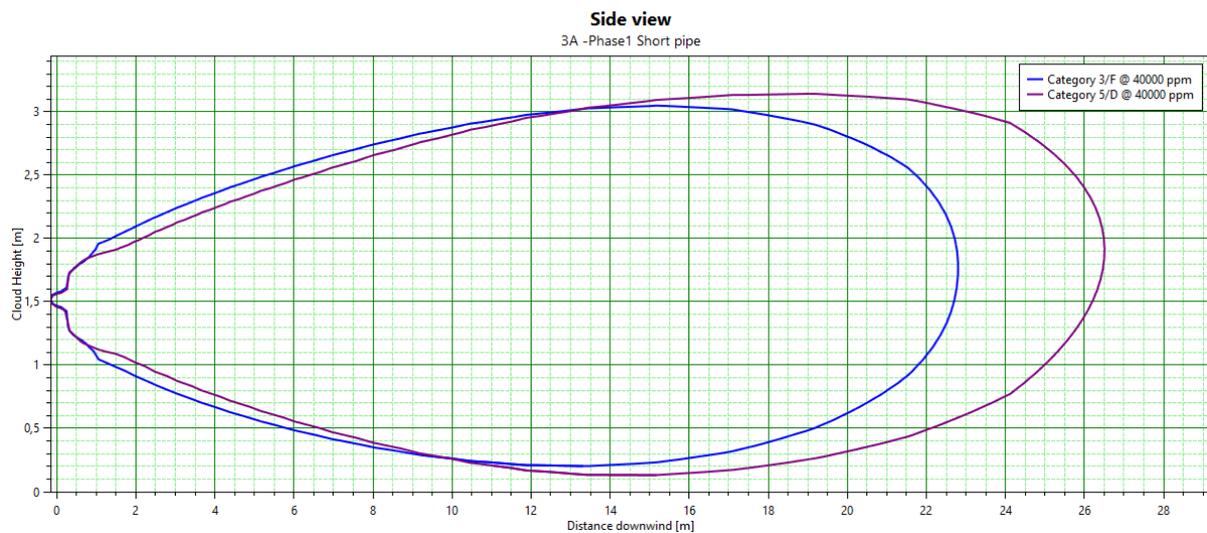


Figure 14. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3A – Phase 1

Les effets du flash-fire en phase 2 sont de l'ordre de 5 m au maximum comme représentés sur la figure suivante :

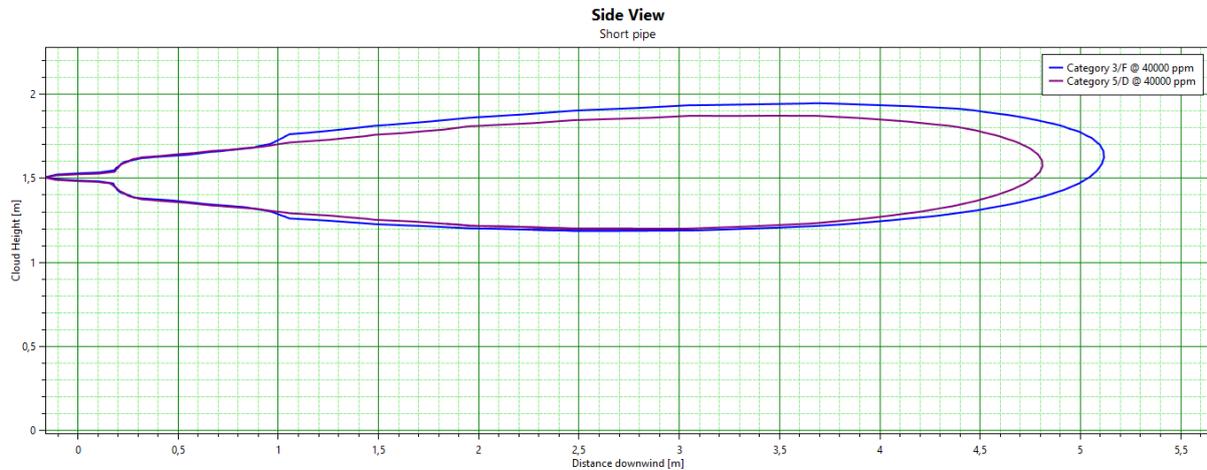


Figure 15. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3A – Phase 2

Les effets de la phase 1 de ce scénario ne sont pas contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Phénomène dangereux	SELS	SEL	SEI
Jet enflammé – Phase 2	Interne		
	-		
Flash-fire - Phase 1	Externe		
	SOLVALOR $S_{\text{impactée}}$ 650 m ² : 0,65 p Champ $S_{\text{impactée}}$ 1 500 m ² : 0,002 p	SOLVALOR $S_{\text{impactée}}$ 700 m ² : 0,7 p Champ $S_{\text{impactée}}$ 1 800 m ² : 0,002 p	
Flash-fire - Phase 2	Interne		
	-		

Tableau 22. Enjeux impactés par les effets de l'ER 3A

Les seuils SEI et SELS atteignent un enjeu externe au site. Il s'agit d'une zone de biotraitement des déchets de terre sans présence humaine en fonctionnement normal. Néanmoins, dans une approche majorante, les cibles présentes dans la zone sont prises en compte dans le calcul de la gravité, au prorata de la surface touchée.

Le niveau de gravité correspondant est de **3 – Important** (zone SELS avec « Au plus 1 personne touchée »).

Probabilité :

Seule la portion aérienne de la tuyauterie en sortie de l'électrolyseur, dont le métré est de 9,5 m, est prise en compte dans l'évaluation de la fréquence de ce scénario. Il convient de noter que sur ce métré de 9,5 m, seuls 2,5 m de tuyauterie sont en DN100, le reste de la tuyauterie étant en DN 25. Dans une approche volontairement conservatrice, le métré total est considéré pour l'évaluation de la fréquence, bien qu'une brèche de 10 % de la section sur une portion de tuyauterie en DN25 générerait de moindres effets.

Sur la base calculs de conséquences de fuite à 40 barg réalisés avec PHAST, et considérant la localisation de la canalisation en sortie des électrolyseurs, les fuites d'un diamètre inférieur à 5 mm ne génèrent pas d'effets en dehors du site. Ce diamètre équivaut à une taille de brèche comprise entre 1% et 10%

de la section de passage pour une section de tuyauterie en DN 25, et à une taille de brèche comprise entre 0,1% et 1% pour une section de tuyauterie en DN100. Par conséquent, la gamme de taille de fuite retenue pour l'estimation de la fréquence de cet l'ER3A est de 0,1% à 10% de la section pour la tuyauterie :

La fréquence de l'événement redouté 5A est ainsi :

$$F(ER3A) = 9,5 * (3,7 * 10^{-6} + 9,6 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7}) = 4,9 * 10^{-5}$$

La probabilité d'inflammation est prise en compte comme exposé en section 9.2.2. Compte tenu du débit de rejet initial, une probabilité d'inflammation immédiate de 0,9 est considérée. La probabilité d'inflammation retardée est évaluée à 0,1 et apparait dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

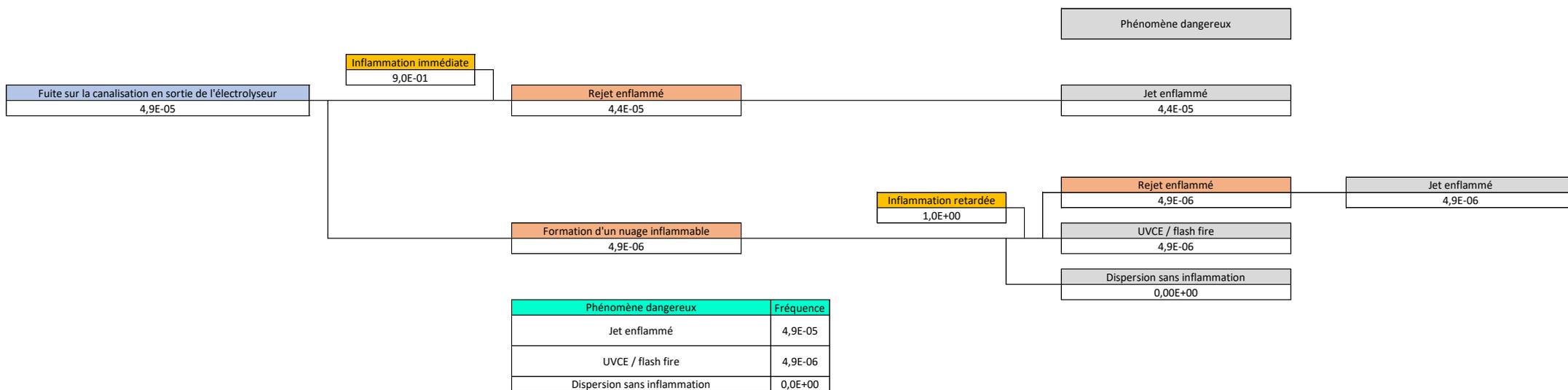


Figure 16. Noeud papillon ER 3 - Fuite sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur (hors conteneur)

Le risque correspondant à l'ER 3A est évalué de la façon suivante :

ER 3A	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
ER 3 A – Jet enflammé	D	-	-
ER 3 A – Flash-Fire	E	Important	MMR Rang 1

9.4.3.2 ER 3 B : Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur

Deux phases sont distinguées dans le cas de la rupture sur la canalisation en sortie de l'électrolyseur :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par l'inventaire statique d'hydrogène dans l'électrolyseur et la tuyauterie,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de production de l'électrolyseur.

Phase	1	2
Inventaire	650 L	Illimité
Débit de fuite	16,7 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	0,1 s	3600 s

Tableau 23. Données d'entrée ER 3 B

D'après le rapport d'étude de l'INERIS N° DRA-14-133133-02917A, pour un rejet de courte durée (<3s), la flamme du phénomène de jet enflammé n'a pas le temps de s'établir et la dose reçue est considérée nulle.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	-	NA
	Phase 2	7,3	7,3	7,3	-	6,7
UVCE		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Phase 1	7	10	27	34	1,3 kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Phase 1	Distances d'effet (m)	27,8	37,9	41,7 m		
	Distances d'effet maximale (m)	27,8 à h=1,8 m	37,9 à h=2,1 m			
Phase 2	Distances d'effet (m)	2,1	3,5	3,85 m		
	Distances d'effet maximale (m)	3,5 à h=2,5m	4,2 à h=1,9m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

En phase 1, le phénomène de décompression ayant lieu très rapidement (moins d'1 seconde), la quantité d'hydrogène relâchée constitue un nuage inflammable de 1,3kg. Au vu de la localisation de la fuite dans un environnement peu encombré et non confiné, les distances d'effets d'explosion ont été calculé selon la méthode multi-énergie, indice 5.

Le phénomène d'UVCE n'est pas considéré comme crédible pour la phase deux du scénario, la masse inflammable obtenue étant de l'ordre de quelques grammes. Sa combustion ne génère pas d'effets de surpression significatifs.

Les effets du flash-fire en phase 1 sont de l'ordre de 37 m au maximum comme représentés sur la figure suivante :

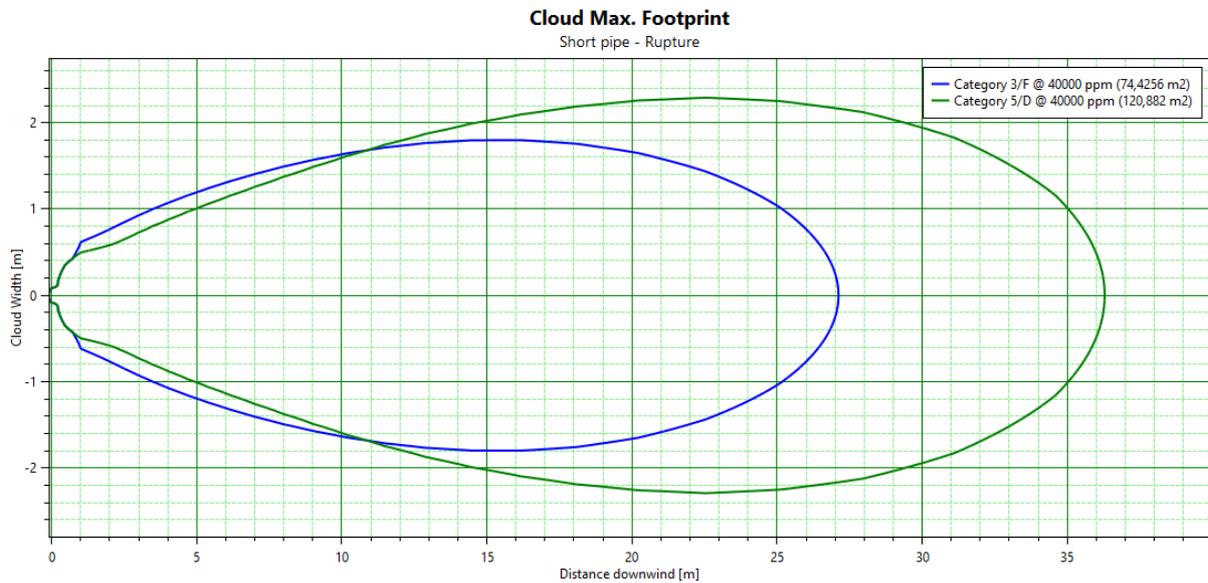


Figure 17. Représentation du nuage d'hydrogène maximal à la LIE pour l'ER 3B - Phase 1

Les effets du flash-fire en phase 2 sont de l'ordre de 5 m au maximum comme représentés sur la figure suivante :

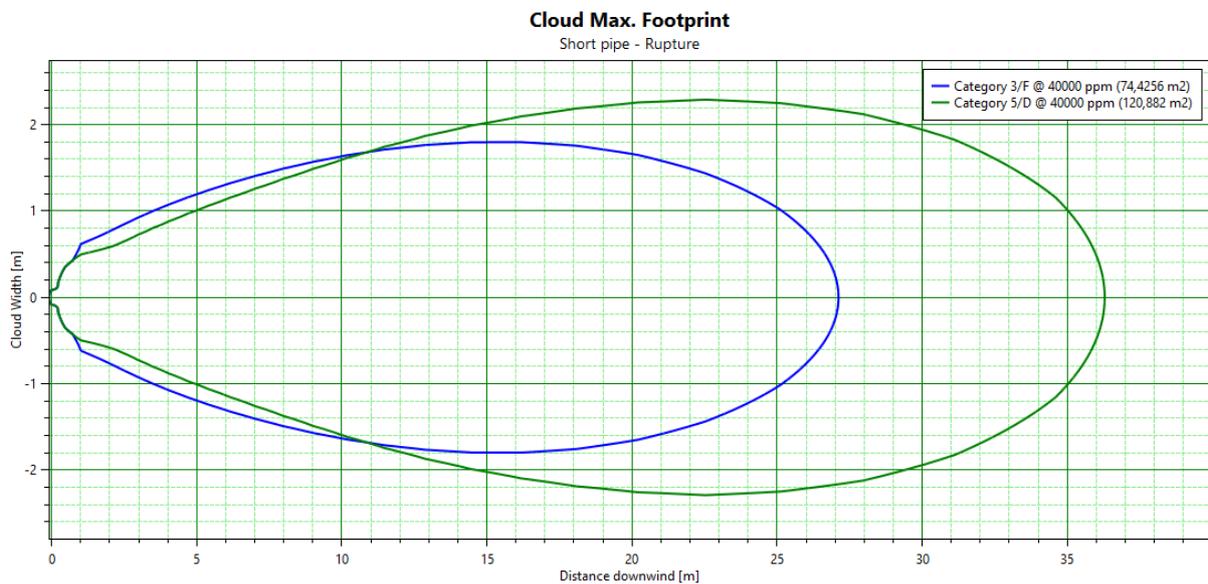


Figure 18. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 3B - Phase 2

Les effets de la phase 1 de ce scénario ne sont pas contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Phénomène dangereux	SELS	SEL	SEI
Jet enflammé	Interne		
	-		
UVCE - Phase 1	Interne	Externe	
	-	SOLVALOR S _{impactée} 650 m ² : 0,7 p Champ S _{impactée} 1 500 m ² : 0,2 p	
Flash-fire - Phase 1	Externe		
	SOLVALOR S _{impactée} 900 m ² : 0,9 p Champ S _{impactée} 2 500 m ² : 0,3 p Route : longueur 55m 0,05 p	SOLVALOR S _{impactée} 1 000 m ² : 1 p Champ S _{impactée} 2 700 m ² : 0,3 p Route : longueur 60m 0,05 p	
Flash-fire - Phase 2	Interne		
	-		

Tableau 24. Enjeux impactés par les effets de l'ER 3B

Le niveau de gravité correspondant est de 3 – **Important** (zone SELS avec « Au plus 1 personne exposée »).

Probabilité :

Seule la portion aérienne de la tuyauterie en sortie de l'électrolyseur, dont le mètre est de 9,5 m, est prise en compte dans l'évaluation de la fréquence de ce scénario. Il convient de noter que sur ce mètre de 9,5 m, seuls 2,5 m de tuyauterie sont en DN100, le reste de la tuyauterie étant en DN 25. Dans une approche volontairement conservatrice, le mètre total est considéré pour l'évaluation de la fréquence, bien qu'une rupture sur une portion de tuyauterie en DN25 donnerait des effets moindres.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est ainsi calculée:

$$F(ER3B) = 9,5 * 1,5 * 10^{-7} = 1,4 * 10^{-6}$$

La probabilité d'inflammation est prise en compte comme exposé en section Probabilité d'inflammation. Compte tenu du débit de rejet initial, une probabilité d'inflammation immédiate de 0,9 est considérée. La probabilité d'inflammation retardée est évaluée à 0,1 et apparaît dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

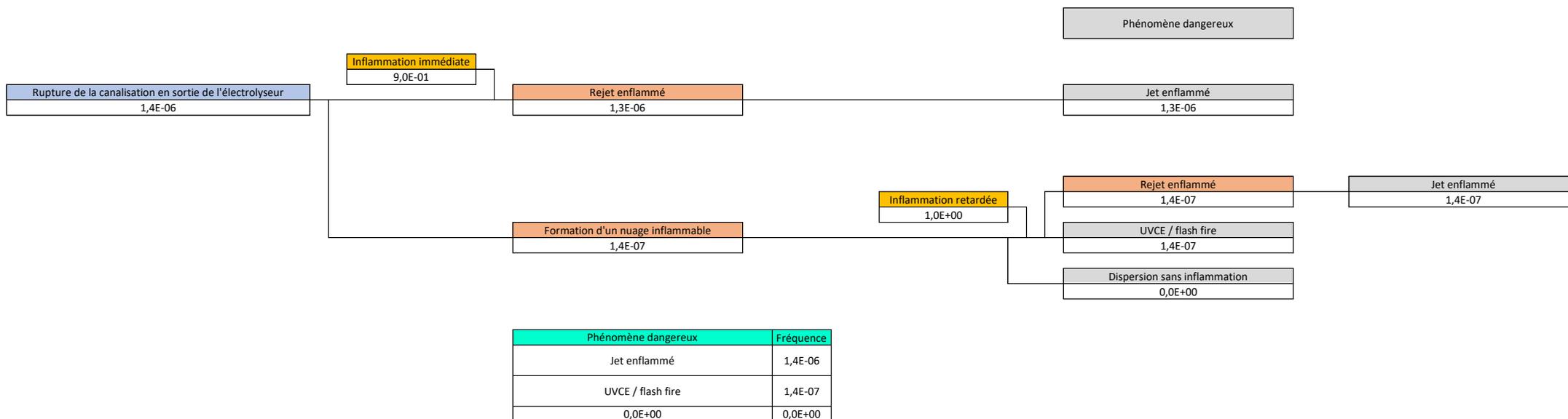


Figure 19. Nœud papillon ER 3B- Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur (hors conteneur)

Le risque correspondant à l'ER 3B est évalué de la façon suivante :

ER 3 B	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
ER 3B - Jet enflammé ¹	E	-	-
ER 3B - UVCE	E	Modéré	Acceptable
ER 3B - Flash-Fire	E	Important	MMR Rang 1

9.4.4 ER 4 : Fuite d’H₂ dans le conteneur des compresseurs

Les compresseurs du site sont abrités dans deux conteneurs identiques, chacun scindé en deux parties totalement hermétiques : une partie abritant les équipements de procédé et une partie abritant les équipements de contrôle commande ainsi que les pompes du circuit hydraulique des compresseurs. La partie des conteneurs abritant les équipements de procédé représente un volume de 17 m³. Pour rappel, l’hydrogène est comprimé de 40 barg jusqu’à 400 barg au maximum au sein de ces équipements.

En cas de fuite dans le compartiment procédé de l’un des compresseurs, l’hydrogène peut s’accumuler et générer une explosion en cas d’inflammation retardée du volume d’hydrogène accumulé.

Les mesures de maîtrise du risque relatifs à ce scénario sont la ventilation artificielle du conteneur, en fonctionnement permanent, ainsi que la détection fixe d’hydrogène au sein du compartiment procédé des compresseurs (un détecteur en partie haute dans le compartiment, un détecteur dans le conduit d’évacuation de la ventilation), qui déclenche un arrêt d’urgence du compresseur induisant sa dépressurisation.

Il convient de noter que les effets thermiques d’un jet enflammé qui se produirait en cas d’inflammation immédiate ne sont pas étudiés car supposés restreints à l’intérieur du conteneur (parois métalliques non-propagatrices des incendies de courte durée, détecteurs d’incendie déclenchant un arrêt d’urgence général du site).

Intensité et gravité :

Il est considéré la formation d’une ATEX à la stœchiométrie d’un mélange d’air et d’hydrogène dans le compartiment procédé du conteneur du compresseur, suite à une fuite sur le circuit.

Le volume de ce compartiment container est de 17 m³. Un taux d’encombrement de 40 % est considéré dans ce volume, le volume disponible pour le mélange inflammable est donc estimé à 10 m³. En l’absence de données précises, la pression de ruine est prise égale à 500 mbar.

Les distances d’effets de surpression obtenues sont les suivantes :

VCE	SELS	SEL	SEI	SBV
	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Container compresseur	3 m	5 m	12 m	24 m
Enjeux impactés	Interne	Interne	Externe	Externe
	-	-	Champ S _{impactée} 300 m ² : 0,0003 p	-

Tableau 25. Distances d’effets de surpression ER 4

Les effets létaux de ce scénario sont contenus à l’intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Les effets irréversibles atteignent une parcelle, propriété de Lhyfe Bessières, en limite sud du site. Ce terrain est non aménagé et très peu fréquenté, il reste néanmoins accessible (absence de clôture). Nous considérons donc la présence d’1 personne par tranche de 100 ha conformément à la fiche 1 de la circulaire du 10 mai 2010.

Le niveau de gravité correspondant est de **1 - Modéré** (zone SEI avec « Au plus 1 personne touchée »).

Probabilité :

De la même manière que pour la fuite à l’intérieur du conteneur de l’électrolyseur, il convient dans un premier temps de justifier la gamme de taille de fuite prise en compte.

En cas de fuite d'hydrogène dans le conteneur, la ventilation permet d'évacuer en partie l'hydrogène accumulé. La concentration d'hydrogène dans le conteneur augmente jusqu'à atteindre une concentration d'équilibre. La quantité d'hydrogène rejeté par la ventilation est alors égale à la quantité apportée par la fuite. La concentration d'équilibre peut être calculée avec la formule suivante :

$$C_{eq} = \frac{Q_{in}}{Q_{out}}$$

où :

- Q_{in} est le débit volumique de fuite d'hydrogène en m³/s ;
- Q_{out} est le débit volumique de ventilation en m³/s.

Le débit volumique de la ventilation du conteneur du compresseur est 3 600 m³/h soit 1 m³/s. Il peut en être déduit que les fuites de débit massique inférieur à 3,2.10⁻³ kg/s ne généreront pas de concentration en hydrogène dans le conteneur supérieure à la LIE (4% de concentration volumique). Ce débit correspond à une section de fuite comprise entre 0,01% et 0,1 % de la section de passage des tuyauteries présentes à l'intérieur du conteneur du compresseur (d'un diamètre interne de 50 mm). Par conséquent, la contribution des fuites de taille inférieure à 0,01 % de la section de passage est exclue du calcul.

Il est considéré que la détection fixe d'hydrogène qui équipe les conteneurs des compresseurs et déclenche un arrêt d'urgence des compresseurs en cas de détection d'une concentration d'hydrogène supérieure à 15% de la LIE soit 0,6% de concentration volumique permet d'empêcher l'évènement redouté pour les fuites de taille inférieure à 10% de la section de canalisation.

Cet évènement est susceptible de se produire sur une canalisation en DN25 dont la longueur est de 20m et deux compresseurs sont comptabilisés par conteneur de compression.

En effet, il convient de noter que le site comporte deux compresseurs, comportant chacun deux multiplicateurs. En fonctionnement, le site n'utilise que deux multiplicateurs d'un même conteneur sur les quatre installés. Ainsi, l'estimation de la fréquence de cet évènement redouté est réalisée sur la base du comptage des équipements présents dans un seul conteneur de compression, listés ci-dessus :

- pour la petite fuite à l'intérieur du conteneur :

$$F = (20 * (3,7 * 10^{-6} + 9,6 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7})) + 2 * (1,7 * 10^{-2} + 4,6 * 10^{-3} + 1,5 * 10^{-4}) \\ = 4,4 * 10^{-2}$$

Pour rappel, la contribution des fuites de taille inférieure à 0,01 % de la section de passage est exclue du calcul.

- pour la fuite majeure à l'intérieur du conteneur :

$$F = (20 * 1,5 * 10^{-7} + 2 * 1,5 * 10^{-5}) = 3,3 * 10^{-5}$$

Par ailleurs, la probabilité d'inflammation est intégrée au calcul probabiliste. La canalisation concernée est située en zone ATEX, puisque le volume dans lequel l'hydrogène peut s'accumuler est classé zone ATEX 2. La probabilité totale d'inflammation retardée retenue est de 0,1.

La fréquence d'occurrence du scénario est calculée au moyen du nœud papillon ci-après :

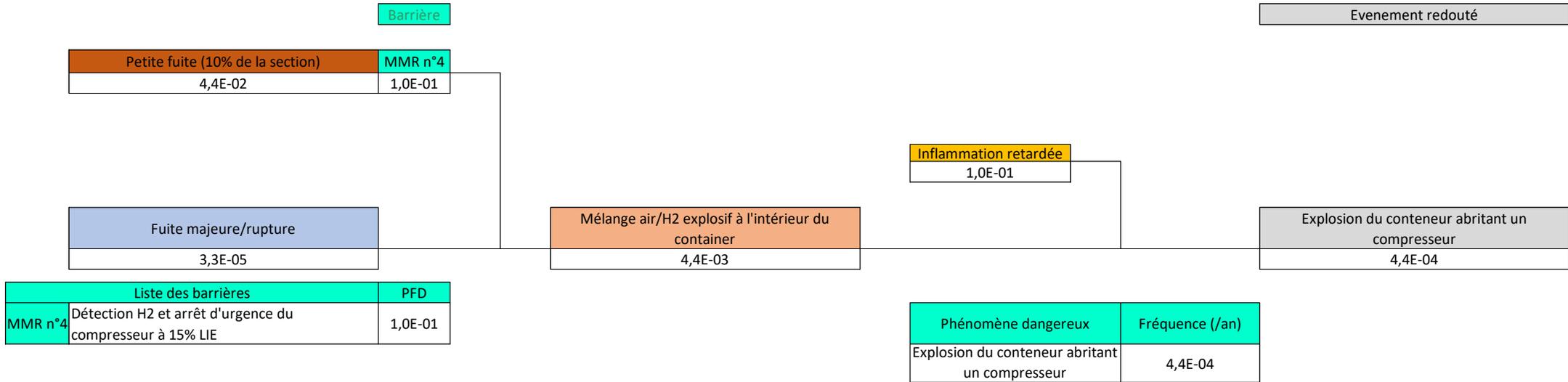


Figure 20. Nœud papillon ER 4 - Fuite d'H2 dans le conteneur des compresseurs

La fréquence du scénario correspond ainsi à un niveau de probabilité de C.

Le risque correspondant à l'ER 4 est évalué de la façon suivante :

ER 4	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
VCE	C	Modéré	Acceptable

9.4.5 ER 5 : Fuite sur circuit H2 rack au refoulement des compresseurs

A la sortie des compresseurs, l'hydrogène comprimé à 400 barg au maximum chemine en canalisation pour alimenter les loges de chargement des capacités de stockage mobiles d'hydrogène. La majeure partie de cette canalisation est installée en caniveau mais comporte des portions aériennes :

- en sortie des compresseurs, à environ 1 m de hauteur ;
- en rack le long du mur coupe-feu au fond des loges de chargement d'hydrogène, à 4 m de hauteur ;
- pour alimenter la platine principale de distribution, à environ 2 m de hauteur le long du mur coupe-feu au fond des loges de chargement d'hydrogène ;
- pour alimenter la capacité tampon d'hydrogène à haute pression, le long du mur coupe-feu au fond des loges de chargement d'hydrogène à environ 2 m de hauteur ;
- pour alimenter les platines de chargement d'hydrogène à l'intérieur des loges de chargement, à environ 2 m de hauteur.

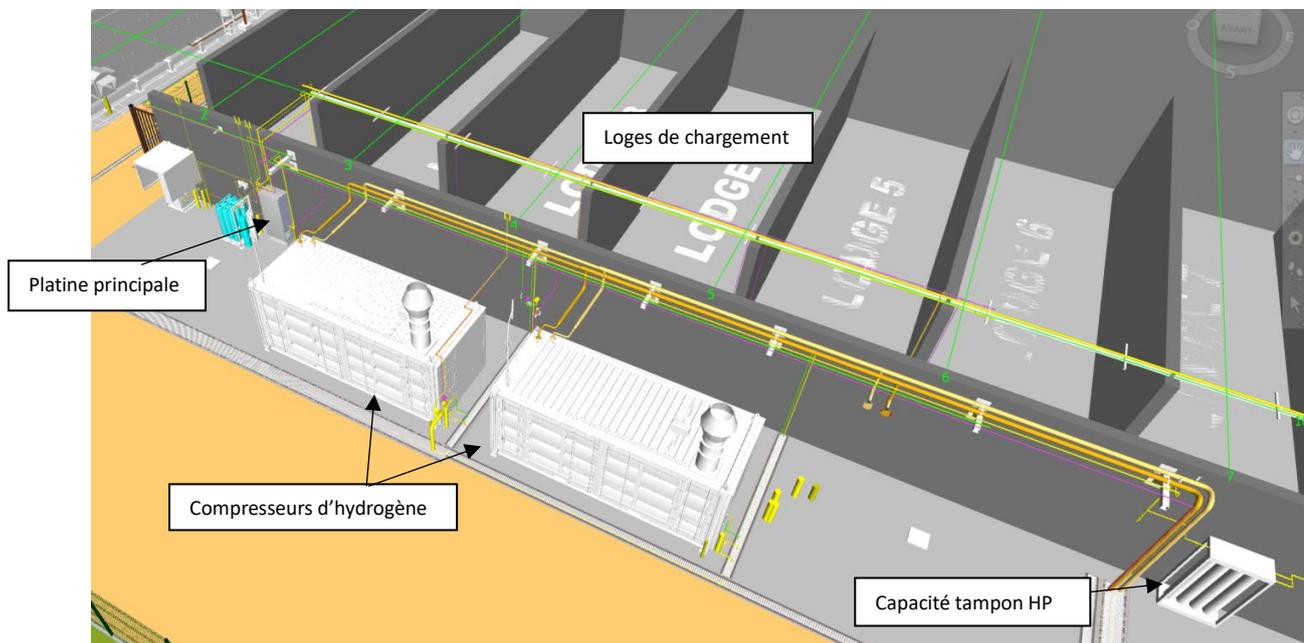


Figure 21. Extrait de la maquette 3D orientée vers les canalisations d'hydrogène haute pression du site

L'ER 5 traite les scénarios de fuite et de rupture de la portion de canalisation positionnée en rack à 4 m de haut, alors que l'ER 6 traite les scénarios analogues sur la portion de canalisation à hauteur d'homme.

Deux sous-scénarios ont été pris en compte pour l'ER 5 :

- ER 5 A : Scénario de fuite d'une taille équivalente à 10% du diamètre de la tuyauterie,
- ER 5 B : Scénario de rupture de tuyauterie.

Intensité et gravité :

Les distances d'effets potentielles de cet évènement sont modélisées avec le modèle « SHORT PIPE » de PHAST.

La tuyauterie concernée est celle reliant le compresseur aux zones de chargement. Le tracé comprend un passage en hauteur. Dans une approche conservatrice, seule la fuite horizontale est présentée

dans la suite de l'étude. Les distances d'effets ont néanmoins été vérifiées pour un rejet vertical : aucun effet thermique ou de surpression n'est susceptible de dépasser les limites de propriété.

Les données d'entrées suivantes ont été prises en compte :

Pression de service	400 barg
Température de service	30 °C
Inventaire	Illimité
Direction de fuite	Horizontale
Hauteur de fuite	4 m
DN	25

Tableau 26. Données d'entrée ER 5

9.4.5.1 ER 5 A : Petite fuite sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

Deux phases sont distinguées dans le cas d'une fuite de 10% du diamètre de la canalisation :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par le stockage tampon de 228 L,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de compresseur.

Phase	1	2
Inventaire	228 L	Illimité
Débit de fuite	0,08 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	54 s	3 600 s

Tableau 27. Données d'entrée ER 5A

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		1800 kW/m ² 4/3.s	1000 kW/m ² 4/3.s	600 kW/m ² 4/3.s	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	-	5,2 m
	Jet enflammé		8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-
Distances d'effet (m)	Phase 2	NA	NA	NA	-	NA
	UVCE		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Distances d'effet (m) à h = 1,5 m	Phase 1	NA	NA	NA		
	Phase 2	NA	NA	NA		
Distances d'effet maximale (m)	Phase 1	9,1 à h=4m	9,1 à h=4m	10		
	Phase 2	4,8 à h=4m	4,9 à h=4m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Pour rappel, les distances d'effets du jet enflammé et de l'UVCE présentés dans le tableau ci-dessus sont calculées à hauteur d'homme (1,5 m).

Le phénomène d'UVCE n'est pas considéré comme crédible pour ce scénario, la masse inflammable obtenue étant de l'ordre de quelques grammes. Sa combustion ne génère pas d'effets de surpression significatifs.

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 4,8 m au maximum pour la phase 2 comme représentés sur la figure suivante :

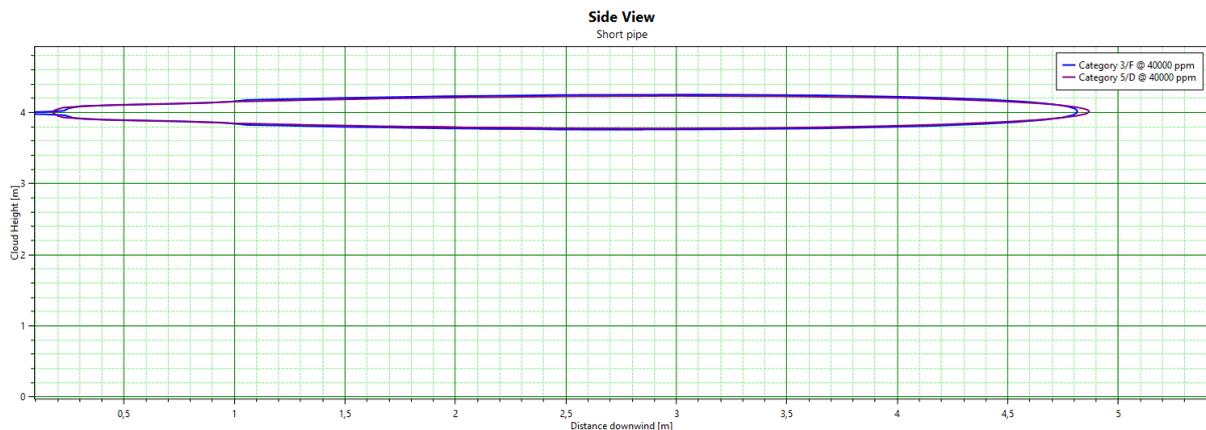


Figure 22. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 5A – Phase 2

Les effets de ce scénario sont contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

9.4.5.2 ER 5 B : Rupture de ligne sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

Deux phases sont étudiées dans le cas d'une rupture de canalisation :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par le stockage tampon de 228 L,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de compresseur.

Phase	1	2
Inventaire	228 L	Illimité
Débit de fuite	1,7 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	3s	3600s

Tableau 28. Données d'entrée ER 5B

D'après le rapport d'étude de l'INERIS N° DRA-14-133133-02917A, pour un rejet de courte durée (<3s), la flamme du phénomène de jet enflammé n'a pas le temps de s'établir et la dose reçue est considérée nulle.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		1800 kW/m ² /3.s	1000 kW/m ² /3.s	600 kW/m ² /3.s	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA		17
Jet enflammé		8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 2	NA	NA	NA	-	NA
UVCE		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	17	34	1,3 kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Distances d'effet (m) à h = 1,5 m	Phase 1	NA	NA	NA		
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	
Distances d'effet maximale (m)	Phase 1	32 à h=4,3m	32 à h=4,4m			
	Phase 2	5,7 à h=4,1m	5,8 à h=4,1m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Pour rappel, les distances d'effets du jet enflammé et de l'UVCE présentés dans le tableau ci-dessus sont calculées à hauteur d'homme (1,5 m).

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 5,8 m au maximum pour la phase 2 comme représentés sur la figure suivante :

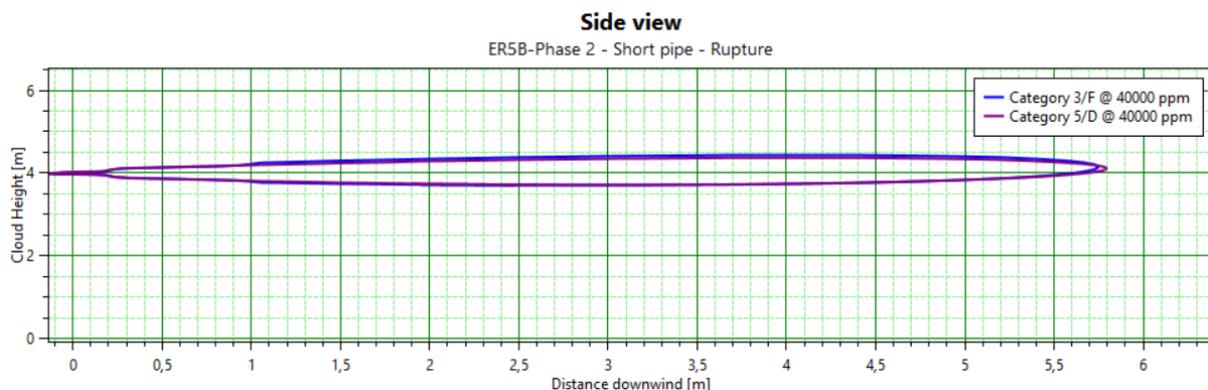


Figure 23. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 5B

Les effets irréversibles de ce scénario sont contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Les distances d'effets de surpression potentielles du phénomène d'UVCE d'un nuage d'hydrogène de 1,3kg ont été évalués selon le modèle « MULTI-ENERGY EXPLOSION » du logiciel PHAST. Le rejet ayant lieu en hauteur, dans une zone non encombrée, l'indice multi-énergie 4 a été retenu.

La cartographie des distances d'effets est disponible en Annexe 3.

Les effets irréversibles atteignent une parcelle, propriété de Lhyfe Bessières, en limite sud du site. Ce terrain est non aménagé et très peu fréquenté, il reste néanmoins accessible (absence de clôture). Nous considérons donc la présence d'1 personne par tranche de 100 ha. La gravité des phénomènes dangereux consécutifs à l'événement redouté sont estimées comme suit :

Phénomène dangereux	SELS	SEL	SEI
Jet enflammé	Interne		
	-		
UVCE – Phase 1	Interne	Externe	
	-	Champ $S_{\text{impactée}} 1\ 000\ \text{m}^2 : 0,001\ \text{p}$	
Flash-fire	Interne		
	-		

Tableau 29. Enjeux impactés par les effets de l'ER 5B

La gravité du phénomène dangereux UVCE consécutif à l'ER 5B est donc **1-Modéré** (SEI avec « au plus 1 personne impactée »).

Probabilité :

Le mètre de la canalisation au refoulement des compresseurs, en DN25, qui chemine en rack à 4 m de hauteur est de 57 m.

La gamme de taille de fuite prise en compte est comprise entre 1% et 100% de la section de passage de la tuyauterie. 1% Par ailleurs, la probabilité d'inflammation est intégrée au calcul probabiliste. L'événement redouté traité représentant la rupture guillotine d'une tuyauterie, la probabilité d'inflammation immédiate est portée à 1.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est ainsi calculée:

$$F(ER5B) = 59 * (1,5 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7}) = 3,5 * 10^{-5}$$

La probabilité d'inflammation est prise en compte comme exposé en section 9.2.2. Compte tenu du débit de rejet initial, une probabilité d'inflammation immédiate de 0,9 est considérée. La probabilité d'inflammation retardée est évaluée à 0,1 et apparait dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

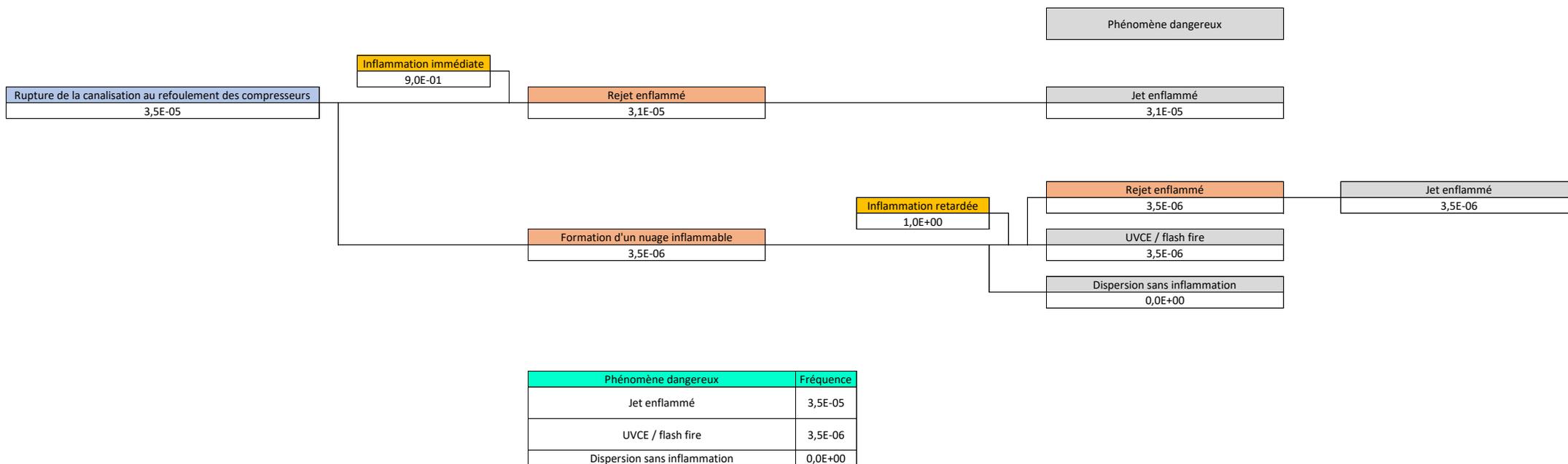


Figure 24. Noeud papillon ER 5A – Rupture de ligne sur circuit H2 rack au refoulement des compresseurs

Le positionnement des phénomènes dangereux consécutifs à l'ER 5B dans la matrice MMR est le suivant :

ER 5 B	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
ER 5B - Jet enflammé	D	-	-
ER 5B - UVCE	E	Modéré	Acceptable
ER 5B - Flash-Fire	E	-	-

9.4.6 ER 6 : Fuite ou rupture sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

L'ER 6 traite les scénarios de fuite et de rupture de la portion de canalisation au refoulement des compresseurs cheminant à hauteur d'homme. De manière conservatrice, les fuites considérées ont été modélisées à une hauteur de 1,5 m.

Deux sous-scénarios ont été pris en compte pour l'ER 6 :

- ER 6 A : Scénario de fuite d'une taille équivalente à 10% du diamètre de la tuyauterie,
- ER 6 B : Scénario de rupture de tuyauterie.

Intensité et gravité :

Les distances d'effets potentielles de cet évènement sont modélisées avec le modèle « SHORT PIPE » de PHAST.

Les données d'entrées suivantes ont été prises en compte :

Pression de service	400 barg
Température de service	30 °C
Inventaire	Illimité
Direction de fuite	Horizontale
Hauteur de fuite	1,5 m
DN	25

Tableau 30. Données d'entrée ER 6

9.4.6.1 ER 6 A : Petite fuite sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

Deux phases sont distinguées dans le cas d'une fuite de 10% du diamètre de la canalisation :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par le stockage tampon de 228 L,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de compresseur.

Phase	1	2
Inventaire	228 L	Illimité
Débit de fuite	0,08 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	54 s	3600s

Tableau 31. Données d'entrée ER 6A

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		1800 kW/m²/3.s	1000 kW/m²/3.s	600 kW/m²/3.s	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	6,5		6
	Jet enflammé	8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²		Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 2	2,9	2,9	3	-	2,8
	UVCE	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Distances d'effet (m) à h = 1,5 m	Phase 1	7,7	7,2	8,5 m		
	Phase 2	4,5	4,3	5 m		
Distances d'effet maximale (m)	Phase 1	7,7 à h=1,5m	7,2 à h=1,5m			
	Phase 2	4,5 à h=1,5m	4,3 à h=1,5m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Le phénomène d'UVCE n'est pas considéré comme crédible pour ce scénario, la masse inflammable obtenue étant de l'ordre de quelques grammes. Sa combustion ne génère pas d'effets de surpression significatifs.

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 7,7 m au maximum pour la phase 1 comme représentés sur la figure suivante :

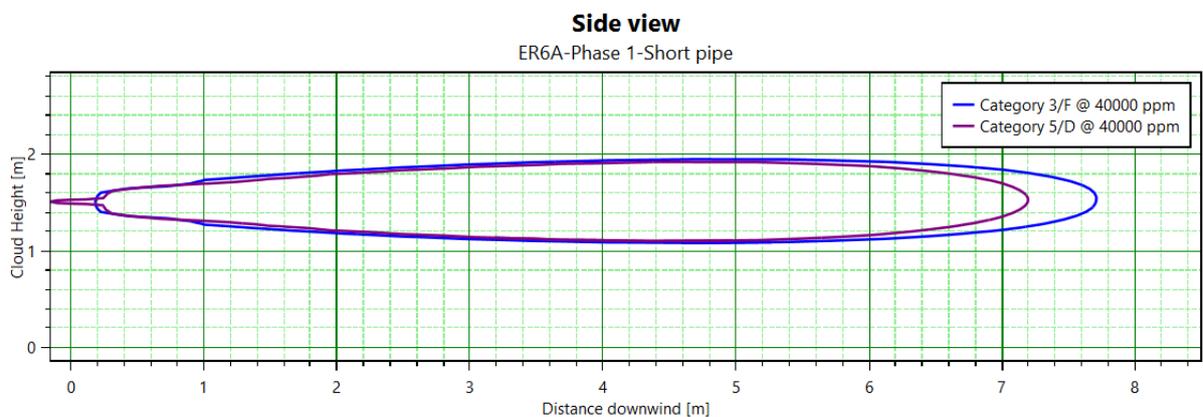


Figure 25. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6A - Phase 1

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 4,5 m au maximum pour la phase 2 comme représentés sur la figure suivante :

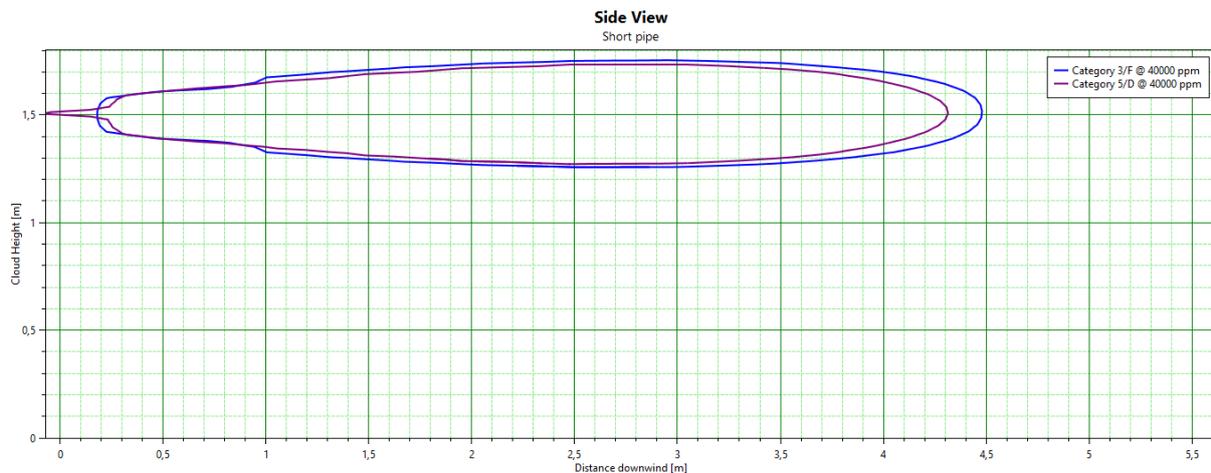


Figure 26. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6A – Phase 2

Les effets de ce scénario sont contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières.

Probabilité :

Pour les besoins de l'analyse des effets domino (voir sections 9.4.9, 9.4.10 et 10.3), la fréquence des potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté a été évaluée avec l'arbre d'événements de la page suivante, les fuites de surface inférieure à 0,01% de la section de passage ayant été exclues.

La fréquence est évaluée dans cet arbre d'événements sur la base d'un mètre de 8 m, correspondant au maximum entre :

- la longueur de tuyauterie présente dans une sphère de 3 m, distance au seuil des effets dominos associée au jet enflammé consécutif à cet événement redouté, autour de la capacité tampon d'hydrogène à haute pression ;
- la longueur de tuyauterie cheminant à l'intérieur d'une loge de chargement, prise en compte dans le calcul de l'effet domino impactant un cylindre d'hydrogène embarqué sur un CGEM.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est ainsi calculée:

$$F(ER6A) = 8 * (3,7 * 10^{-6} + 9,6 * 10^{-7}) = 3,7 * 10^{-5}$$

Le débit de rejet étant inférieur à 1 kg/s, et le nuage inflammable susceptible d'atteindre des zones où des sources d'inflammation peuvent se trouver, la probabilité d'inflammation immédiate et la probabilité d'inflammation retardée respectivement retenues sont 0,1 et 0,9. La probabilité d'inflammation retardée évaluée à 0,1 apparaît dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

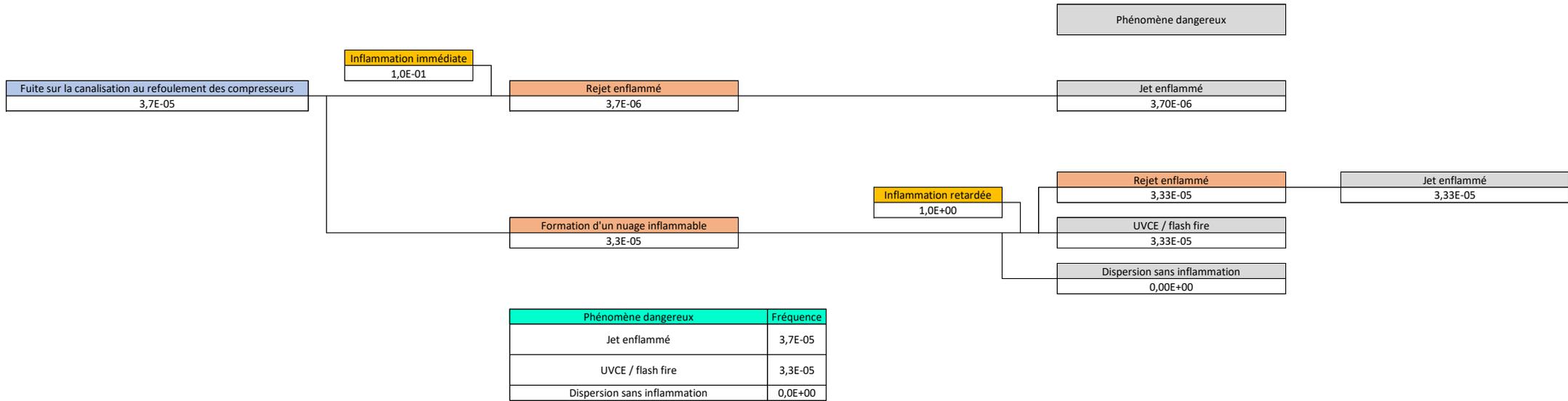


Figure 27. Noeud papillon ER 6A - Petite fuite sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

9.4.6.2 ER 6 B : Rupture de ligne H2 au refoulement des compresseurs

Deux phases sont étudiées dans le cas d'une rupture :

- Phase 1 : Phase de décompression alimentée par le stockage tampon de 228 L,
- Phase 2 : Phase limitée par le débit de compresseur.

Phase	1	2
Inventaire	228 L	Illimité
Débit de fuite	1,7 kg/s	0,025 kg/s
Durée de fuite	3 s	3600s

Tableau 32. Données d'entrée ER 6B

D'après le rapport d'étude de l'INERIS N° DRA-14-133133-02917A, pour un rejet de courte durée (<3s), la flamme du phénomène de jet enflammé n'a pas le temps de s'établir et la dose reçue est considérée nulle.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels :

Phénomène Dangereux		SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé		1800 kW/m²/3.s	1000 kW/m²/3.s	600 kW/m²/3.s	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 1	NA	NA	NA	-	21
Jet enflammé		8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	Phase 2	3,7	3,9	4,1	-	3,7
UVCE		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Phase 1	Cf tableau page suivante				1,8 kg
	Phase 2	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire		Distance à la LIE				
		3F	5D	SEI		
Distances d'effet (m) à h = 1,5 m	Phase 1	35	40	44 m		
	Phase 2	5	4,8	5,5 m		
Distances d'effet maximale (m)	Phase 1	35,7 à h=2,2m	42,5 à h=2,6m			
	Phase 2	5,1 à h=1,6m	4,8 à h=1,6m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 40 m au maximum pour la phase 1 comme représentés sur la figure suivante :

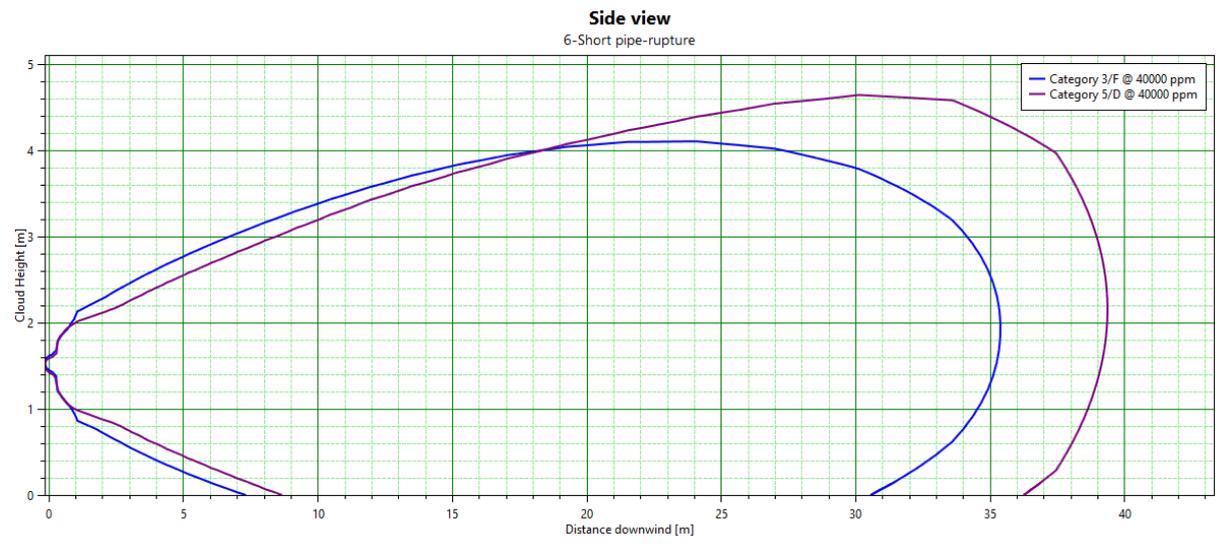


Figure 28. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6B - Phase 1

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 5 m au maximum pour la phase 2 comme représentés sur la figure suivante :

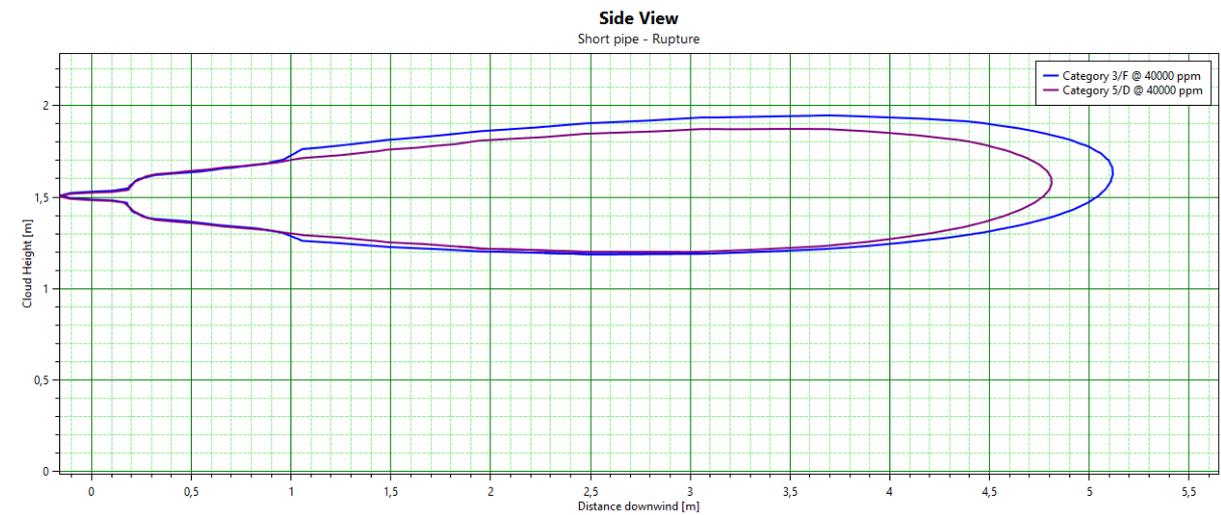


Figure 29. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 6B – Phase 2

Les distances d'effets de surpression potentielles du phénomène d'UVCE d'un nuage d'hydrogène de 1,8kg ont été évalués selon le modèle « MULTI-ENERGY EXPLOSION » du logiciel PHAST.

Pour prendre en compte les différences de confinement et l'encombrement, deux localisations ont été considérées :

- Au niveau des loges : le confinement est élevé. L'indice multi-énergie considéré est 8 ;
- En dehors des loges : les degrés de confinement et d'encombrement sont faibles. L'indice multi-énergie considéré est 6.

Les distances d'effets obtenues pour une explosion dans et en dehors des loges sont identiques pour les seuils de pression suivants :

Phénomène Dangereux	SELS	SEL	SEI	SER
UVCE	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Distances d'effet (m)	20	27	66	132

La cartographie des distances d'effets est disponible en Annexe 3. Les classes de gravité associées à chaque phénomène dangereux générant des effets en dehors du site ont été évaluées comme suit :

Phénomène dangereux	SELS	SEL	SEI
UVCE Phase 1	Externe		
	Champ S _{impactée} 500 m ² : 0,0005 p	Champ S _{impactée} 1 500 m ² : 0,0015 p	SOLVALOR S _{impactée} 1 000 m ² : 1 p Champ S _{impactée} 5 000 m ² : 0,005 p
Flash-fire Phase 1	Externe		
	SOLVALOR S _{impactée} 200 m ² : 0,2 p Champ S _{impactée} 1 700 m ² : 0,0017 p Route longueur 70m : 0,06 p	SOLVALOR S _{impactée} 250 m ² : 0,25 p Champ S _{impactée} 1 800 m ² : 0,0018 p Route longueur 75m : 0,06 p	

Le niveau de gravité correspondant à ces deux phénomènes dangereux est de **3 – Important** (zone SELS avec « Au plus 1 personne touchée »).

Probabilité :

Le mètre de la canalisation au refoulement des compresseurs, en DN25, qui chemine à hauteur d'homme, est de 29,5 m.

La gamme de taille de fuite prise en compte est comprise entre 1% et 100% de la section de passage de la tuyauterie. 1% de la section de passage de la tuyauterie correspond à 10% du diamètre de celle-ci, taille de fuite représentative de l'ER 5A.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est ainsi calculée:

$$F(ER6B) = 29,5 * (1,5 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7}) = 1,8 * 10^{-5}$$

La probabilité d'inflammation est prise en compte comme exposé en section 9.2.2. Compte tenu du débit de rejet initial, une probabilité d'inflammation immédiate de 0,9 est considérée. La probabilité d'inflammation retardée est évaluée à 0,1 et apparaît dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

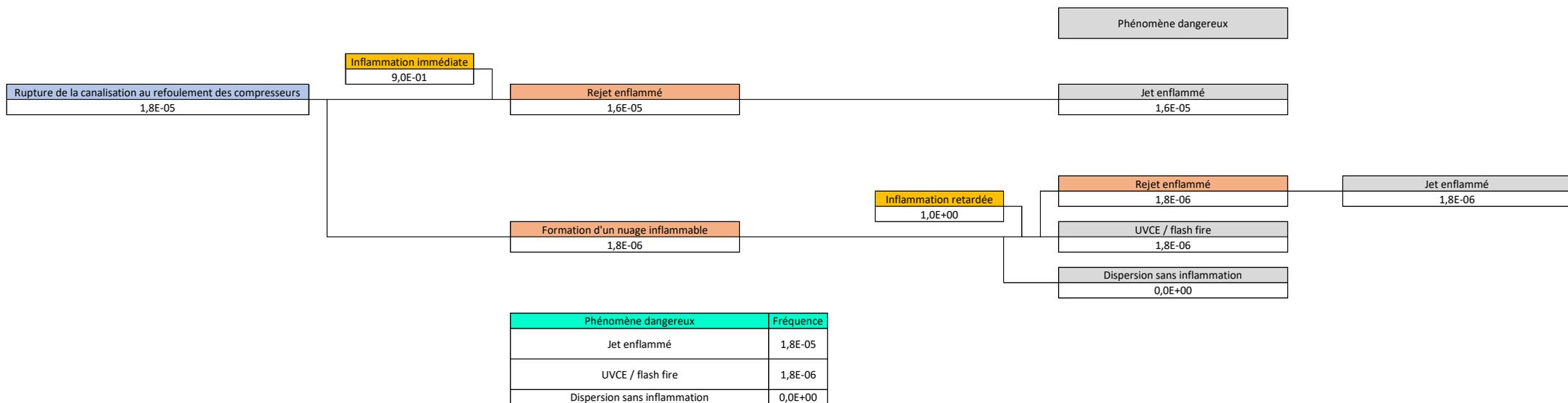


Figure 30. Noeud papillon ER 6B – Rupture de ligne sur circuit H2 au refoulement des compresseurs

Le positionnement des phénomènes dangereux consécutifs à l'ER 6B dans la matrice MMR est le suivant :

ER 6B	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
ER 6B – jet enflammé	D	-	-
ER 6B - UVCE	E	Important	MMR Rang 1
ER 6B - flash fire	E	Important	MMR Rang 1

9.4.7 ER 7 : Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène

L'évènement redouté étudié dans cette section est une rupture de flexible utilisé pour le chargement de capacités de stockage mobile d'hydrogène.

Intensité et gravité :

Les distances d'effets potentielles de cet évènement sont modélisées avec le modèle « SHORT PIPE » de PHAST.

Les données d'entrées suivantes ont été prises en compte :

Pression de service	400 barg
Température de service	30 °C
Inventaire	1100 kg
Direction de fuite	Horizontale
Hauteur de fuite	1 m
DN	8

Tableau 33. Données d'entrée ER 7

Compte-tenu du faible débit de fuite et de la cinétique rapide d'atteinte d'un état d'équilibre du nuage inflammable, de l'ordre de quelques secondes, une hypothèse d'inventaire illimité a été considérée.

Aux conditions opératoires précisées ci-dessus, le débit de fuite calculé est 0,25 kg/s.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 3 phénomènes dangereux potentiels consécutifs à l'évènement redouté :

Phénomène Dangereux	SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé	8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	8,5	8,9	9,2	-	7,5
UVCE	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	NA	NA	NA	NA	<< 1kg
Flash-fire	Distance à la LIE				
	3F	5D	SEI		
Distances d'effet (m) à h = 1,5 m	14,9	13	16,4		
Distances d'effet maximale (m)	15,2 à h=1,2m	14 à h=1,1m			

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Le phénomène d'UVCE n'est pas considéré comme crédible pour ce scénario, la masse inflammable obtenue étant de l'ordre de quelques grammes. Sa combustion ne génère pas d'effets de surpression significatifs.

Les effets du flash-fire sont de l'ordre de 15 m au maximum comme représentés sur la figure suivante :

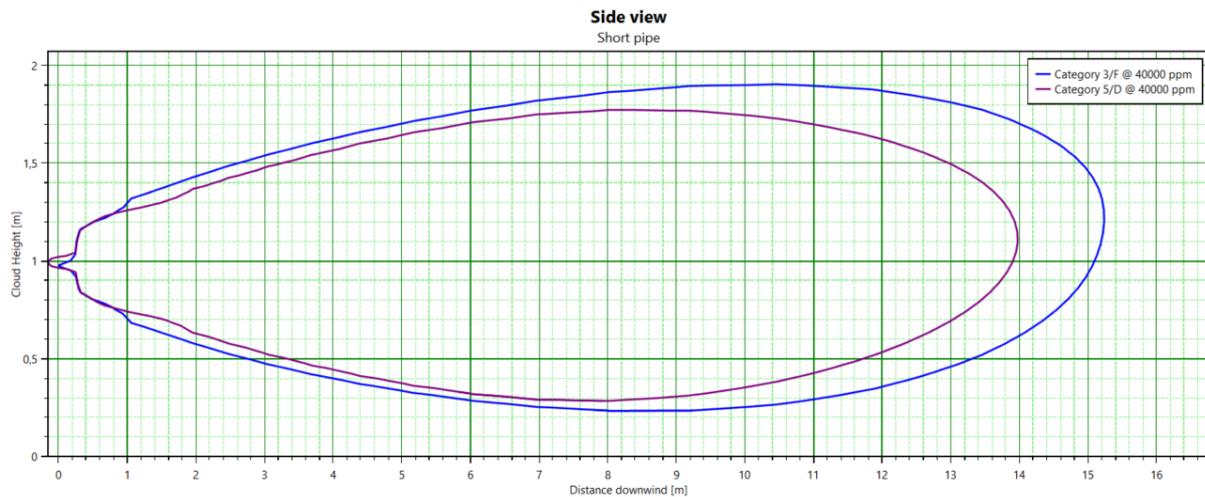


Figure 31. Représentation du nuage d'hydrogène à la LIE pour l'ER 7

Les effets de ce scénario sont contenus à l'intérieur des limites de propriété du site Lhyfe de Bessières. Par ailleurs l'impact du jet enflammé consécutif à la rupture de flexible sur d'autres équipements du site est maîtrisé via la mise en place de murs coupe-feu 2h au niveau des loges de chargement d'hydrogène (un mur coupe-feu plein et mis en place au fond des loges de chargement, ainsi que des murs coupe-feu séparatifs entre chaque loge).

Probabilité :

Pour les besoins de l'analyse des effets domino (voir sections 9.4.9 et 10.3), la fréquence des potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté a été évaluée.

Cet évènement est susceptible de se produire sur un flexible d'un diamètre interne de 8 mm.

L'événement redouté représente les fuites sur flexible d'une taille comprise entre 10% du diamètre du flexible et le diamètre de ce dernier. Les fuites de taille inférieures génèrent des distances d'effets de l'ordre de quatre mètres au maximum et ne contribuent pas à la fréquence de l'événement redouté étudié.

Le site n'est pas conçu pour réaliser plusieurs remplissages en parallèle, un seul flexible est donc comptabilisé pour l'estimation de la fréquence de l'événement redouté :

$$F(ER7) = 1,5 * 10^{-4} + 6,2 * 10^{-5} = 2,1 * 10^{-4}$$

Le débit de rejet étant inférieur à 1 kg/s, et le nuage inflammable susceptible d'atteindre des zones où des sources d'inflammation peuvent se trouver, la probabilité d'inflammation immédiate et la probabilité d'inflammation retardée respectivement retenues sont 0,1 et 0,9. La probabilité d'inflammation retardée évaluée à 0,9 apparaît dans l'arbre d'événements associé à l'événement redouté comme une probabilité conditionnelle d'inflammation retardée de 1, sachant qu'il n'y a pas eu d'inflammation immédiate.

Il convient de noter que Lhyfe a mis en place deux mesures de maîtrise des risques permettant de détecter une telle fuite et de l'isoler :

- Une détection de chute de pression via le capteur de pression associé à chaque loge de remplissage, qui déclenche l'arrêt du compresseur et la fermeture des vannes d'alimentation des loges de chargement d'hydrogène via l'automate de procédé du site ;
- En cas de fuite enflammée, une détection de flamme via le détecteur de flamme d'hydrogène associé à chaque loge de remplissage, qui déclenche l'arrêt du compresseur et la fermeture de la vanne de la platine principale via l'automate de sécurité du site.

Le niveau de confiance associé à chacune de ces mesures de maîtrise des risques est justifié en section 9.6.

Il convient par ailleurs de mentionner, même si cela n'est pas valorisé dans l'analyse de fréquence du scénario, que les flexibles font l'objet d'un suivi renforcé de la part des équipes d'opération et de maintenance du site, et que les démarrages se font via une séquence prédéfinie semi-automatisée. Cette séquence prévoit notamment un test de tenue à la pression des flexibles avant tout chargement, qui prévoit la pressurisation du flexible, le suivi de la pression sur un intervalle de temps prédéfini dans l'automate, et l'arrêt de la séquence si une chute trop pression trop importante est détectée.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

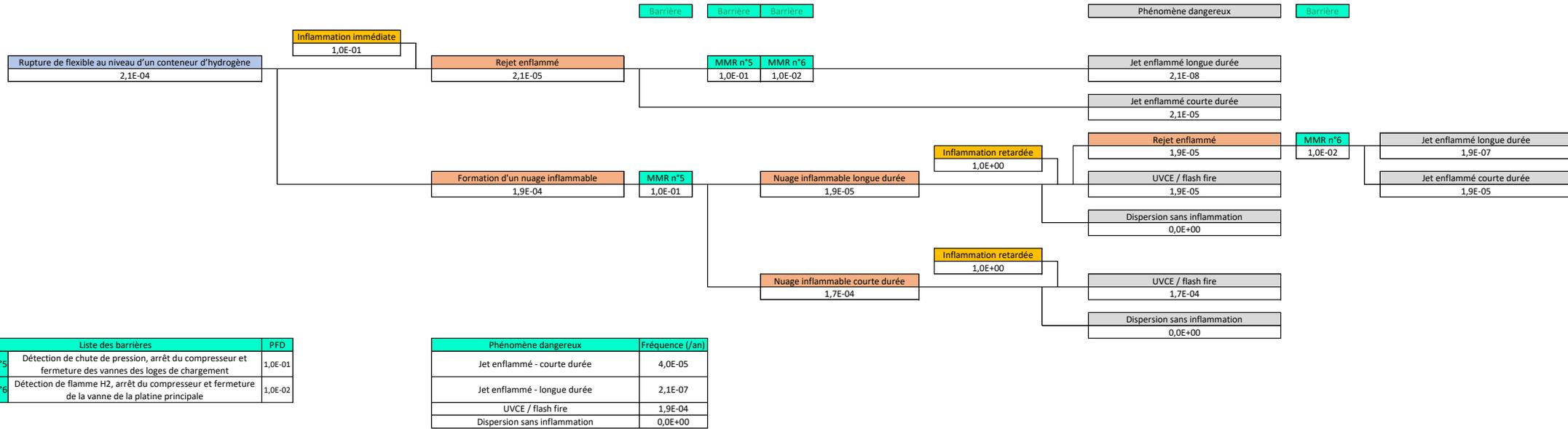


Figure 32. Noeud papillon ER 7 - Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène

9.4.8 ER 8 : Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres

L'événement redouté étudié dans cette section est une rupture d'une des lignes d'alimentation des cylindres sur une remorque utilisée pour le transport de capacités de stockage mobile d'hydrogène.

Intensité et gravité :

Les distances d'effets potentielles de cet événement sont modélisées avec le modèle « SHORT PIPE » de PHAST. Dans une approche conservatrice, la fuite a été modélisée avec un rejet vers le bas, créant ainsi une accumulation dans le container abritant les cylindres de stockage d'hydrogène. Les conséquences de ce sous-scénario sont majorantes par rapport aux conséquences de l'autre sous-scénario lié à un rejet vers le haut consécutif à cette rupture.

Les remorques utilisées pour le transport de capacités de stockage mobile d'hydrogène sont fermées mais ajourées en partie haute pour éviter une potentielle accumulation d'hydrogène à l'intérieur du conteneur. Considérant également la densité de l'hydrogène (plus léger que l'air), il est considéré que les effets d'un flash-fire consécutif à l'événement redouté étudié se propageraient à partir d'une hauteur de 4 mètres correspondant à la hauteur d'une remorque. A l'instar du flash-fire consécutif à une fuite ou une rupture sur la tuyauterie haute pression à 4 m de hauteur, un tel flash-fire n'aurait pas d'effets à hauteur d'homme.

Les données d'entrées suivantes ont été prises en compte pour la modélisation du jet enflammé consécutif à cet événement redouté :

Pression de service	400 barg
Température de service	30 °C
Inventaire	Illimité
Direction de fuite	Vers le sol
Hauteur de fuite	3,5
DN	25
Condition météo	1F

Tableau 34. Données d'entrée ER 8

Compte-tenu du faible débit de fuite et de la cinétique rapide d'atteinte d'un état d'équilibre du nuage inflammable, de l'ordre de quelques secondes, une hypothèse d'inventaire illimité a été considérée.

Les distances d'effets suivantes sont obtenues pour les 2 phénomènes dangereux potentiels modélisés:

Phénomène Dangereux	SELS	SEL	SEI	SER	
Jet enflammé	8 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	-	Longueur de flamme
Distances d'effet (m)	13	16,5	21,2	-	19,7
VCE	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar	Masse inflammable
Distances d'effet (m)	Cf tableau page suivante				10 kg

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

Les effets de surpression de ce scénario ont été calculés en envisageant l'accumulation d'hydrogène dans l'enceinte du conteneur utilisé pour le transport de capacités mobiles de transport d'hydrogène. Le volume libre maximal associé aux remorques utilisées par Lhyfe pour le transport de capacités de stockage mobile d'hydrogène est de 7,25m³. Ce volume a été calculé en retranchant au volume total de la remorque le volume occupé par les cylindres de stockage d'hydrogène. De manière conservatrice,

ce volume libre a été considéré totalement rempli d'hydrogène pour la modélisation, bien que conteneurs utilisés disposent de dispositifs d'aération.

Pour modéliser une explosion confinée dans ce volume, l'indice multi-énergie de 8 a été retenu pour tenir compte des facteurs suivants :

- Degré de confinement élevé,
- Degré d'encombrement élevé,
- Faible énergie d'activation,
- Réactivité élevée de l'hydrogène.

Les distances d'effets de surpression potentielles du phénomène de VCE d'un nuage d'hydrogène dans un volume de 7,25m³, évalués selon la méthode Multi-énergie, sont les suivantes :

Phénomène Dangereux	SELS	SEL	SEI	SER
VCE	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Distances d'effet (m)	10	13	31	62

La cartographie des distances d'effets, réalisée pour le jet enflammé et pour l'explosion confinée consécutifs à cet événement redouté, est disponible en Annexe 3. Sur la base de cette cartographie, la gravité associée aux phénomènes dangereux a été estimée comme suit :

Phénomène dangereux	SELS	SEL	SEI
Jet enflammé	Interne	Interne	Interne
	-	-	-
VCE	Interne	Externe	Externe
	-	Champ S _{impactée} 100 m ² : 0,0001 p	SOLVALOR S _{impactée} 250 m ² : 0,25 p Champ S _{impactée} 1 000 m ² : 0,001 p Route longueur 60 m : 0,05 p

Les seuils SEI et SEL du VCE atteignent un enjeu externe au site. Par conséquent les cibles présentes dans le champ et au niveau de la route sont prises en compte dans le calcul de la gravité.

Le niveau de gravité correspondant est de 2 - Sérieux (zone SEL avec « Au plus 1 personne touchée »)

Probabilité :

Le mètre de canalisation pris en compte pour cet événement redouté est de 30 m.

La gamme de taille de fuite considérée est comprise entre 0,1% et 100% de la section de de la tuyauterie, étant admis que les fuites de plus petite taille ne généreront pas d'effets hors site et ne sont pas susceptibles de générer une accumulation d'hydrogène dans le conteneur.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est donc :

$$F(ER8) = 30 * (1,5 * 10^{-7} + 4,6 * 10^{-7} + 9,6 * 10^{-7}) = 4,7 * 10^{-5}$$

Par ailleurs, la probabilité d'inflammation est intégrée au calcul probabiliste. Les conteneurs utilisés pour le transport des capacités de stockage mobiles d'hydrogène sont considérés comme zone ATEX où les sources d'inflammation sont maîtrisées. Une probabilité d'inflammation immédiate et une probabilité d'inflammation retardée de 0,1 chacune sont retenues.

L'arbre d'événements ci-dessous schématise les potentiels phénomènes dangereux consécutifs à la survenue de l'événement redouté.

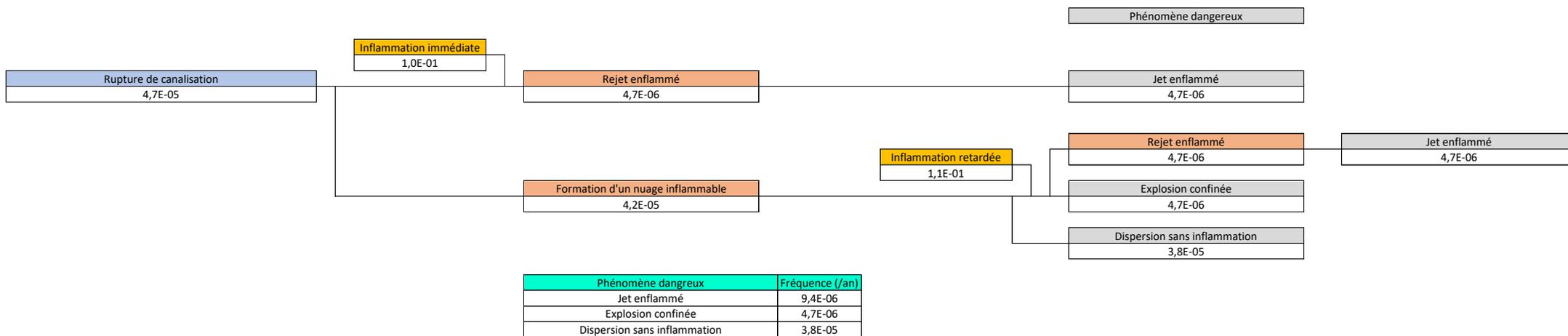


Figure 33. Noeud papillon ER 8 - Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres

Le positionnement des phénomènes dangereux consécutifs à l'ER 8 dans la matrice MMR est le suivant :

ER 8	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
Jet enflammé	E	-	-
Explosion confinée	E	Sérieux	Acceptable

9.4.9 ER 9 : Eclatement d'une bouteille de stockage d'H2

L'événement redouté étudié dans cette section est l'éclatement d'un cylindre de stockage d'hydrogène, embarqué sur un conteneur de gaz à éléments multiples qui sert à l'export de l'hydrogène produit par voie routière (capacités de stockage mobiles).

Les bases de données de probabilités génériques ne fournissent pas d'estimation de fréquence pour ce type d'événement. Celui-ci va donc être analysé à la lumière des différents événements susceptibles de l'initier.

Trois causes potentielles d'éclatement des cylindres de stockage sont retenues dans la présente étude : une agression mécanique externe, une surpression interne, et une agression thermique. Dans la suite de l'étude, c'est l'éclatement suite à une agression thermique qui va être étudiée, pour les raisons suivantes :

- Outre le fait que la configuration du site Lhyfe de Bessières protège les cylindres des agressions mécaniques (les cylindres sont protégés mécaniquement par l'enveloppe des conteneurs de transport positionnés sur les remorques de transport ; de plus les remorques sont stationnées dans des loges de remplissage entourées de murs en béton coupe-feu deux heures, sauf sur l'avant), le scénario d'un éclatement de capacité suite à une agression mécanique se produira à une pression inférieure (pression de service) à la pression attendue en cas d'agression thermique (voir justification sur la pression de rupture retenue plus loin dans cette fiche scénario).
- Concernant le risque de surpression interne, en amont des stockages, le seul équipement susceptible de générer une augmentation de pression dans le système est le compresseur d'hydrogène. Or celui-ci est conçu de façon à ne pas pouvoir délivrer la pression de rupture à froid des cylindres de stockage d'hydrogène évaluée au triple de la pression de calcul des cylindres.

En effet, par conception, la pression délivrée par le compresseur est limitée par la puissance du moteur qui l'entraîne et par les pressions d'hydrogène en amont et en aval. Pour rappel, le procédé est conçu pour une pression en hydrogène de 40 barg à l'aspiration du compresseur et de l'ordre de 400 barg au refoulement. Le compresseur, s'il n'était pas limité à une pression de refoulement maximale de 400 barg, ne pourrait délivrer au refoulement qu'une pression maximale de 600 barg. Il est physiquement impossible que cette conception permette une excursion à une pression supérieure à 600 barg au refoulement du compresseur, ne serait-ce que par la limitation intrinsèque du moteur alimentant l'équipement.

D'autre part, la technologie du compresseur retenue dispose de deux étages de compression, avec à chaque étage un organe de protection contre les surpressions internes (soupapes). De plus, un asservissement de sécurité de pression très haute sera mis en place, reposant sur un capteur implanté au refoulement des compresseurs. Ces barrières techniques de sécurité préviennent une excursion à une pression supérieure à 600 barg au refoulement du compresseur.

Ces équipements étant disposés en série dans le sens du procédé, il est rigoureusement impossible d'envisager leur défaillance simultanée.

Dans le cas des lignes de remplissage à plus basse pression (200 barg et 300 barg), outre le fait que la pression maximale au refoulement du compresseur soit inférieure à la pression d'éclatement des cylindres à froid, une soupape et un asservissement de sécurité de pression très haute par niveau de pression préviennent le risque de surpression interne.

En conclusion, la conception des équipements ne permet en aucun cas d'atteindre un niveau de pression qui puisse excéder la résistance mécanique d'un cylindre de stockage d'hydrogène à froid.

Le phénomène dangereux modélisé ci-après est donc l'éclatement pneumatique de ces capacités sous-pression à la suite d'une agression thermique. La modélisation de ce phénomène dangereux concerne bien chaque capacité prise indépendamment. En effet, dans le cas d'une agression thermique sur un lot de capacités, celles-ci n'éclateraient pas de façon simultanée ; les effets de surpression ne cumuleraient donc pas.

Intensité et gravité :

Sur la base des résultats du projet FireComp⁹, et compte-tenu du fait que l'unique séquence accidentelle susceptible de conduire au phénomène d'éclatement d'un cylindre de stockage d'hydrogène implique l'exposition de l'équipement à un feu impactant, la valeur de la pression de rupture à considérer pour les modélisations est la pression maximale de service pour les cylindres en matériau composite, et 1,5 fois la pression de calcul pour les cylindres métalliques.

Les effets de surpression du scénario sont calculés en considérant comme énergie d'explosion l'énergie de Brode prenant en compte la pression interne de la capacité au moment de la rupture, puis l'abaque de la méthode multi-énergie selon l'indice 10.

Différents types de cylindres équipent les remorques utilisées par Lhyfe. Les calculs d'énergie d'explosion menés sur les différents types de cylindres utilisés montrent que les effets de surpression sont maximisés dans le cas d'utilisation de cylindres qui ont pour pression de service 200 barg et pour volume unitaire de cylindre 2 250 L.

Dans ce cas, la formule de l'énergie de Brode donne :

$$E = 1,82.10^8 \text{ J}$$

D'où dérivent les distances d'effets suivantes aux seuils réglementaires :

VCE		SELS	SEL	SEI	SBV
		200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Distances d'effet (m)		21 m	28 m	61 m	122 m
Enjeux impactés	SOLVALOR	-	S _{impactée} 100 m ² – 0,1 personne	S _{impactée} 2000 m ² – 2 personnes	-
	Champ	S _{impactée} 100 m ² – 0,0001 personne	S _{impactée} 600 m ² – 0,0006 personne	S _{impactée} 4 800 m ² – 0,0048 personne	-
	Route	L _{impactée} 37 m – 0,03 personnes	L _{impactée} 57 m – 0,05 personnes	L _{impactée} 120 m – 0,1 personnes	-
	Serres	-	-	S _{impactée} 180 m ² – 0,15 personne	-

La cartographie des distances d'effets est disponible en Annexe 3.

Le seuil SELS atteint un enjeu externe au site. Par conséquent les cibles présentes dans le champ et au niveau de la route sont comptabilisées.

Le niveau de gravité correspondant est de **3 – Important** (zone SELS avec « au plus 1 personne exposée »).

⁹ Fire tests carried out in FCH JU FireComp project, recommendations and application to safety of gas storage systems, April 2018, International Journal of Hydrogen Energy

Probabilité :

La cause retenue susceptible de mener à l'éclatement d'un cylindre d'hydrogène embarqué sur un conteneur à gaz à éléments multiplies est l'exposition à un feu impactant.

Cette cause est indépendante du type de remorque et du nombre de bouteilles présentes au sein d'une remorque dans la mesure où leur occurrence conduirait à l'éclatement de n'importe laquelle des bouteilles.

La fréquence d'occurrence de l'événement redouté est calculée comme la somme des fréquences des scénarios identifiés dans cette étude susceptibles de mener à l'éclatement d'un cylindre. Il convient de noter que pour mener à l'éclatement d'un cylindre, la survenue d'un feu impactant de longue durée (plus de deux minutes) est nécessaire. Etant données les dispositions constructives mises en place au niveau des loges de chargement (murs coupe-feu 2 heures séparant les différentes loges dans leur longueur et les séparant des compresseurs d'hydrogène à l'arrière), les potentiels éléments agresseurs en cas de fuite enflammée de longue durée sont :

- Le flexible de chargement de la loge concernée ;
- Les canalisations à haute pression cheminant au sein de la loge, dont le mètre a été estimé à 8 m.

La fréquence de l'ER 9 est ainsi évaluée comme la somme des fréquences :

- Du jet enflammé consécutif à la brèche du circuit H2 au refoulement des compresseurs (ER 6A), évaluée pour un mètre de 8 m correspondant au mètre de tuyauterie haute pression cheminant à l'intérieur d'une loge de chargement, considérant une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/6, la probabilité de défaillance de l'asservissement de sécurité de détection de flamme H2 (évaluée à 0,01, cf. section 9.6), et la probabilité de défaillance de l'asservissement de conduite reposant sur la détection de chute de pression (évaluée à 0,1, cf. section 9.6) ;
- Du jet enflammé consécutif à la rupture du circuit H2 au refoulement des compresseurs (ER 6B), évaluée pour un mètre de 8 m correspondant au mètre de tuyauterie haute pression cheminant à l'intérieur d'une loge de chargement, considérant une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/6, la probabilité de défaillance de l'asservissement de sécurité de détection de flamme H2 (évaluée à 0,01, cf. section 9.6), et la probabilité de défaillance de l'asservissement de conduite reposant sur la détection de chute de pression (évaluée à 0,1, cf. section 9.6) ;
- Du jet enflammé de longue durée consécutif à la rupture du flexible (ER 7), considérant une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/6 ;
- Du jet enflammé de longue durée consécutif à une fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres (ER 8), considérant une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/2 (orientation vers le bas).

Le calcul de fréquence du scénario est résumé dans le tableau ci-dessous :

Evénement initiateur	Métré pris en compte (m)	Fréquence de l'événement initiateur (/an)	Probabilité directionnelle (-)	Probabilité de défaillance de l'asservissement de sécurité reposant sur la détection de flamme H2 (-)	Probabilité de défaillance de l'asservissement de conduite reposant sur la détection de chute de pression (-)	Contribution à la fréquence de l'ER 9 (/an)
Jet enflammé consécutif à la brèche sur le circuit H2 au refoulement des compresseurs	8	3,7E-05	0,17	0,01	0,1	6,2E-09
Jet enflammé consécutif à la rupture sur le circuit H2 au refoulement des compresseurs	8	4,9E-06	0,17	0,01	0,1	8,1E-10
Jet enflammé de longue durée consécutif à la rupture du flexible	-	2,1E-07	0,17	Déjà prise en compte dans le calcul de fréquence du jet enflammé de longue durée consécutif à la rupture du flexible		3,5E-08
Jet enflammé consécutif à une fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres	-	9,4E-06	0,5	-		4,7E-06

La fréquence de l'ER 9 est ainsi évaluée à $4,7 \cdot 10^{-6}$ par an, qui correspond à un niveau de probabilité E.

Le risque correspondant à l'éclatement d'une bouteille de stockage d'hydrogène est donc évalué de la façon suivante :

ER 9	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2	E	Important	MMR Rang 1

9.4.10 ER 10 : Eclatement d'un cylindre de la capacité tampon à haute pression

L'événement redouté étudié dans cette section est l'éclatement d'un cylindre de la capacité tampon d'hydrogène à haute pression.

Ces cylindres sont métalliques (type I) et leur pression de calcul est de 500 barg. Ainsi, leur pression d'éclatement à froid peut être estimée à 1 500 barg. De plus, ils sont implantés à l'écart des voies de circulation du site.

L'argumentaire présenté en section 9.4.9 peut ainsi être repris, la seule cause retenue pouvant mener à l'éclatement d'un cylindre de la capacité tampon d'hydrogène à haute pression est l'exposition à un feu impactant.

Intensité et gravité :

Il est considéré un éclatement d'une bouteille de la capacité tampon d'hydrogène à autre pression consécutif à un incendie impactant la capacité.

Pour calculer les distances d'effets potentielles dues à l'éclatement d'une bouteille de la capacité tampon d'hydrogène HP, le modèle « BLEVE BLAST » de PHAST a été utilisé.

Pour la même raison que dans le cas de l'ER 9 (non-cumul des effets de surpression en cas d'explosions multiples), ce sont les effets correspondant à l'éclatement d'une seule bouteille de la capacité tampon qui ont été modélisés.

Les données d'entrée suivantes ont été prises en compte :

Pression maximale de service	400 barg
Pression	$P = \frac{3*1,1* \text{Pression maximale de service}}{2} = 660 \text{ bar}$
Température de service	30°C
Volume d'une bouteille de la capacité tampon	57 L
Diamètre de l'équipement	0,3 m

Tableau 35. Données d'entrée ER 10

Les distances d'effets obtenues sont les suivantes :

VCE	SELS	SEL	SEI	SBV
	200 mbar	140 mbar	50 mbar	20 mbar
Distances d'effet (m)	12 m	15 m	31 m	62 m
Enjeux impactés	Interne	Externe	Externe	-
	-	Champ S _{impactée} 100 m ² – 0,0001 per- sonne	Champ : S _{impactée} 1 000 m ² – 0,001 personne	-
	-	-	Route : L _{impactée} 55 m – 0,05 personne	-

* Les distances retenues pour la suite de l'analyse (évaluation de la gravité et cartographie des dangers) sont indiquées en gras.

La cartographie des distances d'effets est disponible en Annexe 3.

Les seuils SEI et SEL atteignent un enjeu externe au site. Par conséquent les cibles présentes dans le champ et au niveau de la route ont été comptabilisées.

Le niveau de gravité correspondant est de **2 - Sérieux** (zone SEL avec « Au plus 1 personne exposée »).

Probabilité :

Seule la cause relative à un effet domino thermique provoqué par un jet enflammé à proximité a été retenue pour conduire à cet évènement redouté. La capacité tampon d'hydrogène à haute pression est implantée derrière le mur coupe-feu arrière des loges de chargement du site (voir Figure 21).

Le seul équipement potentiellement à l'origine d'un effet domino pouvant impacter les bouteilles de la capacité tampon est la canalisation d'hydrogène à haute pression, au refoulement des compresseurs, qui chemine sur un rack à l'arrière des murs coupe-feu des loges de chargement du site, jusqu'à se connecter la capacité tampon.

La fréquence de l'ER 10 est ainsi évaluée comme la fréquence du jet enflammé consécutif à :

- la rupture du circuit H2 au refoulement des compresseurs (ER 6B), évaluée pour un mètre de 8 m, mètre de tuyauterie présente dans une sphère de rayon 4 m (correspondant à la distance d'effets associée à l'ER 6B au seuil des effets domino) autour de la capacité tampon. Un prorata sur la longueur de tuyauterie prise en compte est appliqué sur la fréquence calculée pour le jet enflammé consécutif à l'ER 6B. Une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/6 a de plus été prise en compte ;
- la petite fuite sur le circuit H2 au refoulement des compresseurs (ER 6A), évaluée pour un mètre de 8 m, estimation majorante du mètre de tuyauterie présente dans une sphère de rayon 3 m (correspondant à la distance d'effets associée à l'ER 6A au seuil des effets domino) autour de la capacité tampon. La probabilité calculée en section 9.4.6.1 a donc pu être directement reprise. Une probabilité directionnelle pour le jet enflammé de 1/6 a de plus été prise en compte :

$$F(\text{ER 10}) = \frac{8}{29,5} * 1,8 * 10^{-5} * \frac{1}{6} + 3,7 * 10^{-5} * \frac{1}{6} = 7,0 * 10^{-6}$$

Cela correspond à la classe de probabilité E.

Le risque correspondant à l'ER 10 est donc évalué de la façon suivante :

ER 10	Probabilité	Niveau de gravité	Niveau matrice MMR
Eclatement d'un cylindre de la capacité tampon HP	E	Sérieux	Acceptable

9.5 Récapitulatif de l'ensemble des mesures de maîtrise des risques (MMR)

Le tableau ci-dessous récapitule les mesures de maîtrise des risques (MMR) valorisées dans cette étude de dangers :

N°	MMR	Scénarii associé	Active / passive Technique / organisationnelle	Indépendance (oui / non)	Efficacité (%)	Temps de réponse	Tests et maintenance / Formation	Niveau de confiance
1	Détection hydrogène en sortie des stacks au niveau du séparateur anode déclenchant l'arrêt de l'électrolyseur et son inertage	ER 1	Active Technique	Oui	100 % (Arrêt de l'alimentation en hydrogène, inertage et ventilation)	Quelques secondes	Test et maintenance tous les 6 mois	NC 1
2	Conception conforme à l'EN 14460 :2018	ER 1	Passive Technique	Oui	100 % L'équipement doit résister à une explosion interne	-	Contrôle visuel annuel Suivi ESP ¹⁰	NC 2
3	Détection hydrogène dans le conteneur de production d'hydrogène asservie à un arrêt d'urgence	ER 2	Active Technique	Oui	100 % (Arrêt de l'alimentation en hydrogène et ventilation)	Quelques secondes	Test et maintenance tous les 6 mois	NC 1
4	Détection hydrogène dans le conteneur de compression avec mise en sécurité de l'installation	ER 4	Active Technique	Oui	100 % (Arrêt de l'alimentation en hydrogène et ventilation)	Quelques secondes	Test et maintenance tous les 6 mois	NC 1

¹⁰ Equipements Sous Pression

N°	MMR	Scénarii associé	Active / passive Technique / organisationnelle	Indépendance (oui / non)	Efficacité (%)	Temps de réponse	Tests et maintenance / Formation	Niveau de confiance
5	Détection de chute de pression, arrêt du compresseur et fermeture des vannes des loges de chargement par l'automate process	ER 7	Active	Oui	100 %	Quelques secondes	Test et maintenance annuel	NC 1
6	Détection de flamme, arrêt du compresseur et fermeture de la vanne de la platine principale par l'automate de sécurité	ER 7	Technique	Oui	100 %	Quelques secondes	Test et maintenance annuel	NC 1

Tableau 36. Tableau récapitulatif des MMR

9.6 Justification de la cotation des MMR

9.6.1 MMR passive

L'unique MMR passive valorisée dans le cadre de cette étude de dangers est la MMR n°1 : Conception conforme à l'EN 14460 :2018. Cette conception permet au séparateur de l'anode de l'électrolyseur et aux tuyauteries associées de résister à une explosion interne.

En accord avec l'évaluation du niveau de confiance forfaitaire proposé dans la publication Omega 10¹¹ de l'INERIS pour les dispositifs passifs, un niveau de confiance 2 est retenu pour cette MMR.

9.6.2 MMR actives

La méthodologie proposée dans la section 4.5.4.1 de l'Omega 10¹¹ a été utilisée pour justifier le niveau de confiance des MMR actives valorisées dans le cadre de cette étude de dangers. Cette méthodologie repose notamment, pour les systèmes autres que les systèmes de traitement programmables (capteurs et actionneurs dans les cas étudiés), sur le caractère validé par l'usage, la tolérance aux anomalies matérielles (ou HFT pour « Hardware Fault Tolerance »), la fréquence de sollicitation et la capacité de diagnostic. Le tableau ci-après explicite l'analyse menée et ses conclusions.

¹¹ Rapport d'étude n° DRA-17-164432-10199B – Evaluation de la performance des barrières techniques de sécurité, Omega 10, 23/05/2018

Dans le cadre de cette analyse, il est considéré que les éléments disposant d'un certificat conformément à la norme IEC 61508¹² peuvent être considérés validés par l'usage car le retour d'expérience quantifié mentionné dans l'Omega 10 pour justifier de ce caractère doit être fourni par le fournisseur de l'équipement pour l'obtention du certificat.

N°	MMR	Scénarii associé	Capteur	Seuil	Logique	Actionneur	Méthode INERIS Omega 10			
							NC potentiel système de traitement programmable	Capteur	Actionneur	Chaîne complète (dispositifs en série, NC minimal individuel retenu)
1	Détection hydrogène en sortie des stacks au niveau du séparateur anode déclenchant l'arrêt de l'électrolyseur et son inertage	ER 1	Voting 1 parmi 1: AIT 201B	1% vol	Automate de sécurité SIL 3 de l'électrolyseur	Voting 1 parmi 2 : - Arrêt de l'alimentation du redresseur de l'électrolyseur - Vanne d'inertage à l'azote du séparateur de l'anode (SDV-501)	NC 3	Système non validé par l'usage (non certifié) Capacité de diagnostic: Oui HFT ¹³ 0 Faible sollicitation NC 1 voire 2	Système non validé par l'usage (non certifié) Capacité de diagnostic: Non HFT 1 Faible sollicitation NC 2	NC 1

¹² Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité

¹³ HFT : Hardware Fault Tolerance, Tolérance aux anomalies matérielles

N°	MMR	Scénarii associé	Capteur	Seuil	Logique	Actionneur	Méthode INERIS Omega 10			
							NC potentiel système de traitement programmable	Capteur	Actionneur	Chaîne complète (dispositifs en série, NC minimal individuel retenu)
3	Détection hydrogène dans le conteneur de production d'hydrogène asservie à un arrêt d'urgence	ER 2	Voting 1 parmi 2: AIT 306 AIT 307	25% LIE	Automate de sécurité SIL 3 de l'électrolyseur	Voting 1 parmi 2 : - Arrêt de l'alimentation du redresseur de l'électrolyseur - Ouverture de la vanne de purge du séparateur de la cathode (BDV-302)	NC 3	Système non validé par l'usage Capacité de diagnostic: Oui HFT 1 Faible sollicitation NC 2 voire 3	Système non validé par l'usage Capacité de diagnostic: Non HFT 1 Faible sollicitation NC 2	NC 2
4	Détection hydrogène dans le conteneur de compression avec mise en sécurité de l'installation	ER 4	Voting 1 parmi 2: HD1701 HD 1601	15% LIE	Automate de sécurité SIL 3 du compresseur	Voting 3 parmi 3 : - Fermeture de la vanne à l'aspiration du compresseur (XV1001) - Fermeture de la vanne au refoulement du compresseur (XV1301) - Ouverture de la vanne de purge du compresseur (XV1302)	NC 3	Système validé par l'usage (certifié) Capacité de diagnostic : Oui HFT 1 Faible sollicitation NC 3	Système non validé par l'usage Capacité de diagnostic: Oui HFT 0 Faible sollicitation NC 1 voire 2	NC 1

N°	MMR	Scénarii associé	Capteur	Seuil	Logique	Actionneur	Méthode INERIS Omega 10			
							NC potentiel système de traitement programmable	Capteur	Actionneur	Chaîne complète (dispositifs en série, NC minimal individuel retenu)
5	Détection de chute de pression, arrêt du compresseur et fermeture des vannes des loges de chargement par l'automate process	ER 7	Voting 1 parmi 1 ¹⁴ : 41B1_PT01 41B1_PT02 41C1_PT01 41C1_PT02 41C1_PT03 41C1_PT04 41D1_PT01 41D1_PT02 41D1_PT03 41D1_PT04	10 barg/s	Automate de procédé Lhyfe	Voting 1 parmi 1, fermeture des vannes des platines secondaires ¹⁵ : - 41B1_YV01 - 41B1_YV03 - 41C1_YV01 - 41C1_YV03 - 41C1_YV05 - 41C1_YV07 - 41D1_YV01 - 41D1_YV03 - 41D1_YV05 - 41D1_YV07	NC 1	Système validé par l'usage (certifié) Capacité de diagnostic : Oui HFT 0 Faible sollicitation NC 2	Système non validé par l'usage Capacité de diagnostic Oui HFT 0 Faible sollicitation NC 1	NC 1

¹⁴ Un seul capteur participe à la réalisation de la fonction, selon la loge utilisée pour le chargement (pas de chargement simultané sur plusieurs loges).

¹⁵ Une seule vanne participe à la réalisation de la fonction, selon la loge utilisée pour le chargement (pas de chargement simultané sur plusieurs loges).

N°	MMR	Scénarii associé	Capteur	Seuil	Logique	Actionneur	Méthode INERIS Omega 10			
							NC potentiel système de traitement programmable	Capteur	Actionneur	Chaîne complète (dispositifs en série, NC minimal individuel retenu)
6	Détection de flamme, arrêt du compresseur et fermeture de la vanne de la platine principale par l'automate de sécurité	ER 7	Voting 6 parmi 6: 41B1_FDT01 41B1_FDT02 41C1_FDT01 41C1_FDT02 41D1_FDT01 41D1_FDT02	100% du signal d'alarme 0-20mA	Automate de sécurité SIL 3 Lhyfe	Voting 1 parmi 2 : - Arrêt d'urgence compresseur 1 et compresseur 2 - Fermeture de la vanne de la platine principale 41A1_YV01	Automate de sécurité NC 3	Système validé par l'usage (certifié) Capacité de diagnostic : Oui HFT 0 Faible sollicitation NC 2	Système non validé par l'usage Capacité de diagnostic : Oui HFT 1 Faible sollicitation NC 2 voire 3	NC 2

Tableau 37. Justification du niveau de confiance associé aux MMR actives

Deux MMR sont valorisées dans le cadre de l'analyse détaillée du même ER 7 : la MMR n°5 et la MMR n°6, identifiées dans les tableaux précédents :

- MMR n°5 : Détection de chute de pression, arrêt du compresseur et fermeture des vannes des loges de chargement par l'automate process ;
- MMR n°6 : Détection de flamme, arrêt du compresseur et fermeture de la vanne de la platine principale par l'automate de sécurité.

L'architecture de ces deux MMR a été détaillée dans le Tableau 38, et ces deux MMR sont indépendantes au niveau de chaque sous-ensemble de l'architecture des fonctions de sécurité réalisées (capteur, traitement logique et actionneur).

Il convient de noter que la MMR n°5 entraîne elle aussi un arrêt des compresseurs du site en cas de sollicitation. Cet arrêt n'a pas été mis en exergue dans le Tableau 38 pour une meilleure lisibilité et justification de l'indépendance avec la MMR n°6, l'action de fermeture des vannes des loges de chargement étant suffisante à la réalisation de la fonction assumée par la MMR.

Le tableau ci-dessous récapitule les niveaux de confiance qui peuvent être associés à chacune des MMR actives valorisées dans le cadre de l'étude de dangers selon la méthodologie de l'Omega 10 :

N°	MMR	Scénarii associé	Niveau de confiance
1	Détection hydrogène en sortie des stacks au niveau du séparateur anode déclenchant l'arrêt de l'électrolyseur et son inertage	ER 1	NC 1
3	Détection hydrogène dans le conteneur de production d'hydrogène asservie à un arrêt d'urgence	ER 2	NC 2
4	Détection hydrogène dans le conteneur de compression avec mise en sécurité de l'installation	ER 4	NC 1
5	Détection de chute de pression, arrêt du compresseur et fermeture des vannes des loges de chargement par l'automate process	ER 7	NC 1
6	Détection de flamme, arrêt du compresseur et fermeture de la vanne de la platine principale par l'automate de sécurité	ER 7	NC 2

Tableau 38. Récapitulatif des MMR actives et du niveau de confiance associé

9.7 Bilan de l'analyse détaillée des risques

Le tableau suivant présente pour chaque évènement redouté étudiés les phénomènes dangereux associés générant des effets en dehors du site, leurs niveaux de probabilité et leurs niveaux de gravité.

N°ER	Description	Phénomène dangereux	Niveau de gravité	Probabilité	Niveau de risque
1	Explosion du séparateur de l'anode de l'électrolyseur O2	Eclatement de capacité	Sérieux	E	Acceptable
2	Fuite d'H2 dans le conteneur de l'électrolyseur	Explosion confinée	Modéré	E	Acceptable
3	3.A Fuite sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur	Flash fire	Important	E	MMR Rang 1
	3.B Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur	Flash fire	Important	E	MMR Rang 1
		UVCE	Modéré	E	Acceptable
4	Fuite d'H2 dans le conteneur des compresseur	Explosion confinée	Modéré	C	Acceptable
5	5.B Rupture sur circuit H2 au refoulement des compresseurs – sur rack	UVCE	Modéré	E	Acceptable
6	6.B Rupture sur circuit H2 au refoulement des compresseurs	Flash fire	Important	E	MMR Rang 1
		UVCE	Important	E	MMR Rang 1
8	Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres	VCE	Sérieux	E	Acceptable
9	Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2	Eclatement de capacité	Important	E	MMR Rang 1
10	Eclatement d'un cylindre de la capacité tampon HP	Eclatement de capacité	Sérieux	E	Acceptable

Tableau 39. Tableau de synthèse des ER

9.8 Matrice des risques majeurs

Le positionnement des scénarios d'accidents étudiés en détail, générant des effets en dehors du site, dans la matrice réglementaire d'acceptabilité des risques de la Circulaire du 10 mai 2010, permet de mettre en évidence l'adéquation d'un site industriel avec son environnement. Pour le cas du site Lhyfe de Bessières, l'intégration des événements redoutés étudiés dans le présent chapitre dans cette matrice conduit à conclure à la bonne maîtrise des risques sur le site et à l'adéquation du niveau global de risque avec les enjeux situés à proximité de l'installation.

Matrice des risques majeurs - ADR							
Gravité des dommages	Désastreux	5					Non
	Catastrophique	4					MMR Rang 2
	Important	3	ER 3A - FF ¹⁶ ; ER 3B – FF ; ER 6B – FF ; ER 6B - UVCE ; ER 9 - ECL ¹⁷				MMR Rang 1
	Sérieux	2	ER 1 - VCE ¹⁸ ; ER 8 - VCE ; ER 10 – ECL				Acceptable
	Modéré	1	ER 2 – VCE ; ER 3B – UVCE ; ER 5B - UVCE ¹⁹		ER 4 - VCE		
			E	D	C	B	A
			< 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ ≤ P < 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ ≤ P < 10 ⁻³	10 ⁻³ ≤ P < 10 ⁻²	≥ 10 ⁻²
Probabilité d'occurrence des scénarios							

Tableau 40. Matrice des risques majeurs du site

¹⁶ FF : Flash fire

¹⁷ ECL : éclatement de capacité

¹⁸ VCE : explosion confinée

¹⁹ UVCE : explosion non confinée

9.9 Justification de la démarche MMR

La matrice des risques majeurs du site fait apparaître 5 scénarios de niveau de risque MMR 1, liés événements redoutés ER 3, 6 et 9.

Les événements redoutés 3 et 6 consistent en des pertes de confinement sur une tuyauterie d'hydrogène, l'ER 3 concernant la tuyauterie reliant l'électrolyseur au compresseur et l'ER 6 celle reliant les compresseurs aux loges de chargement. Les indices A et B font référence à la fuite mineure et à la rupture guillotiné de la tuyauterie respectivement.

Les scénarios de flash fire associés aux ER 3A, 3B et 6B, ainsi que l'UVCE associé à l'ER 6B sont classés comme scénarios de rang MMR 1 dans la matrice des risques majeurs du site, caractérisés par un niveau de gravité « important » et une classe de fréquence E, soit la plus faible possible. Tous ces scénarios sont liés à des fuites d'hydrogène à l'air libre avec inflammation retardée.

Les fuites sur tuyauterie représentées par les ER 3A/B, 6A/B ont été modélisés en deux phases : une première phase de dépressurisation de l'inventaire statique d'hydrogène présent dans les tuyauteries, et une seconde phase représentant la fuite alimentée. La caractérisation des scénarios MMR 1 liés à ces événements redoutés est liée à leur niveau de gravité, « important », sachant que la classe de fréquence de ces scénarios est la plus faible de l'échelle réglementaire. Or, le niveau de gravité « important » de ces scénarios est lié aux zones d'effets létaux hors site associées à la première phase des rejets modélisés, ces premières phases étant de courte durée (2,3 s pour l'ER 3A, 0,1 s pour l'ER 3B, 3 s pour l'ER 6B), cette dernière durée étant par ailleurs supérieure à la durée d'établissement du nuage inflammable consécutif à la perte de confinement (inférieure à la seconde).

Concernant les fuites sur tuyauterie en extérieur, des mesures de maîtrise des risques de type « détection et isolation » auraient pu être valorisées, mais celles-ci n'auraient pas produit de bénéfice quant à l'intensité de ces scénarios, l'ordre de grandeur du temps de réponse de telles mesures étant équivalent voire supérieur à celui de la durée d'établissement du nuage inflammable modélisé. Leur mise en œuvre n'a ainsi pas été justifiée.

Concernant l'ER 9 (éclatement d'un cylindre de stockage d'H₂), celui-ci a fait l'objet d'un effort de réduction du risque particulier via la mise en place de deux mesures de maîtrise des risques indépendantes, permettant de maintenir le scénario dans la classe de fréquence la plus faible de l'échelle réglementaire.

10 EFFETS DOMINOS ET INTERACTIONS

L'objectif de ce chapitre est de présenter :

- D'une part, les interactions possibles entre les équipements du site Lhyfe de Bessières ;
- D'autre part, les interactions possibles entre les installations du site et les entreprises voisines.

On parlera d'effet domino interne dans le premier cas et d'effet domino externe dans le second cas.

10.1 Définition de l'effet domino

L'effet domino est le résultat d'une série d'évènements qui, par les conséquences d'un premier sinistre sur d'autres équipements, peut mener à une situation aggravante, également appelé « suraccident ». Il n'y a d'effet domino que si un équipement critique se trouve inscrit dans le cercle de destruction totale afférent au scénario considéré.

L'effet domino ainsi identifié s'applique à l'équipement critique inscrit dans le cercle de destruction, pour lequel les conséquences quantifiées sont les plus contraignantes.

L'objet de l'étude des effets dominos est d'apprécier les possibilités de suraccident consécutives à un premier accident, majeur ou non.

Selon la réglementation des ICPE, et tel que défini dans l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005, les seuils d'apparition des effets dominos à considérer pour identifier de potentiels suraccidents sont les suivants :

- 8 kW/m² pour les effets thermiques ;
- 200 mbar pour les effets de surpression.

À noter que le phénomène de flash-fire ne génère pas d'effet domino car il s'agit d'un phénomène dangereux de trop courte durée pour engendrer des dégâts sur les structures.

10.2 Effets dominos externes

10.2.1 Interactions de l'installation Lhyfe sur son environnement industriel

Les distances d'effets évalués lors de l'Analyse Détaillée des Risques et les cartographies associées (cf. Annexe 3) font apparaître que le site SOLVALOR, situé à l'ouest du site, n'est pas situé dans les cercles de danger correspondant aux seuils des effets dominos des événements redoutés étudiés dans cette étude de dangers.

Les effets générés par le site ne sont donc pas de nature à engendrer un scénario majeur par effet domino.

10.2.2 Interactions des bâtiments voisins sur les installations du site

L'installation industrielle la plus proche du site Lhyfe de Bessières est prévue à l'extrémité ouest du site. La société SOLVALOR a pour projet de créer et exploiter une plateforme de tri-transit, de terres et sédiments et de traitement et valorisation de déchets.

Une vérification des potentiels effets pouvant impacter le site a été réalisée sur la base de l'étude de dangers de SOLVALOR.

L'étude de dangers du site SOLVALOR conclut que les effets thermiques des scénarios étudiés en analyse détaillée des risques seraient contenus à l'intérieur de l'emprise du site SOLVALOR, et n'impactent donc pas les installations de Lhyfe, a fortiori au seuil des effets dominos.

10.3 Effets dominos internes

10.3.1 Etude selon la gravité

Cette partie développe les conséquences potentielles des scénarios d'accident étudiés en détail au chapitre 9 en termes d'effets domino inter-unités.

À noter que le phénomène de flash-fire ne génère pas d'effet domino car il s'agit d'un phénomène dangereux de trop courte durée pour engendrer des dégâts sur les structures.

Le tableau suivant présente pour chaque ER étudié dans l'Analyse Détaillée des Risques, les équipements du site Lhyfe de Bessières pouvant être impactés au seuil des effets dominos :

ER	Phénomène dangereux	Distances	Equipements impactés	Scénarios majeurs secondaires
1. Eclatement du séparateur de l'anode de l'électrolyseur	Eclatement de capacité ⇒ Surpression ⇒ Projection de missiles	11 m	- Electrolyseur	Aucun
2. Explosion du conteneur de l'électrolyseur	Eclatement de capacité ⇒ Surpression ⇒ Projection de missiles	7 m	- Utilités - Canalisation d'hydrogène en sortie de l'électrolyseur	Rupture tuyauteries : ER 3. Etant donné que le phénomène dangereux initiateur représente une source d'énergie importante, seul le phénomène dangereux domino de jet enflammé est à envisager.
3.A Petite fuite sur circuit H ₂ en sortie de l'électrolyseur	Jet enflammé	5 m	- Conteneur électrolyseur - Conteneur compresseur	Endommagement conteneur : - Casse électrolyseur, fuite d'hydrogène à 40 barg à l'intérieur du conteneur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé de même nature que

ER	Phénomène dangereux	Distances	Equipements impactés	Scénarios majeurs secondaires
				<p>l'événement initiateur et pas par une explosion confinée dans le conteneur.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fuite dans conteneur compresseur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé, potentiellement sur la canalisation haute pression en sortie du compresseur, et pas par une explosion confinée dans le conteneur.
3.B Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur	Jet enflammé	7 m	<ul style="list-style-type: none"> - Conteneur électrolyseur - Conteneur compresseur 	<ul style="list-style-type: none"> - Casse électrolyseur, fuite d'hydrogène à 40 barg à l'intérieur du conteneur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé de même nature que l'événement initiateur et pas par une explosion confinée dans le conteneur. - Fuite dans conteneur compresseur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé de même nature que l'événement initiateur et pas par une explosion confinée dans le conteneur.
	UVCE ⇒ Surpression	7 m	<ul style="list-style-type: none"> - Conteneur électrolyseur - Conteneur compresseur 	<ul style="list-style-type: none"> - Casse électrolyseur, fuite d'hydrogène à 40 barg. Etant donné que le phénomène dangereux initiateur représente une source d'énergie importante, seul le

ER	Phénomène dangereux	Distances	Equipements impactés	Scénarios majeurs secondaires
				phénomène dangereux domino de jet enflammé est à envisager.
4. Explosion du conteneur compresseur	Eclatement de capacité ⇒ Surpression ⇒ Projection de missiles	3 m	Conteneur compresseur Tuyauteries amont et aval compresseur	<ul style="list-style-type: none"> - Endommagement compresseur, mise en sécurité des installations. - Rupture tuyauteries : ER 3, ER 5 et ER 6. Etant donné que le phénomène dangereux initiateur représente une source d'énergie importante, seul le phénomène dangereux domino de jet enflammé est à envisager.
6.A Petite fuite sur circuit H2 en sortie du compresseur	Jet enflammé	3 m	Conteneur compresseur Capacité tampon HP	<ul style="list-style-type: none"> - Fuite dans conteneur compresseur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé de même nature que l'événement initiateur et pas par une explosion confinée dans le conteneur. - Eclatement d'une bouteille de la capacité tampon d'H2 HP => Scénario étudié en ADR ER10 - Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2 => Scénario étudié en ER9
6.B Rupture sur circuit H2 en sortie du compresseur	Jet enflammé	4 m	Conteneur compresseur Capacité tampon HP	<ul style="list-style-type: none"> - Fuite dans conteneur compresseur. Etant donné que l'effet domino est généré par un jet enflammé, l'effet domino se matérialisera également par un jet enflammé de même nature que l'événement initiateur et pas par une explosion confinée dans le conteneur.

ER	Phénomène dangereux	Distances	Equipements impactés	Scénarios majeurs secondaires
				<ul style="list-style-type: none"> - Eclatement d'une bouteille de la capacité tampon d'H2 HP => Scénario étudié en ADR ER10 - Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2 => Scénario étudié en ER9
	UVCE ⇒ Surpression	20 m	Conteneur électrolyseur Conteneur compresseur	- Endommagement conteneurs électrolyseur et compresseur et mise en sécurité des installations.
7. Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène	Jet enflammé	9 m	Cylindres de stockage d'H ₂	Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2 => Scénario étudié en ER 9
8. Fuite au niveau de l'alimentation des cylindres	Jet enflammé	13 m	Cylindres de stockage d'H ₂	Eclatement d'un cylindre de stockage d'H2 => Scénario étudié en ER 9
	UVCE	10 m	Cylindres de stockage d'H ₂	Considérant la nature de l'équipement, il n'est pas vraisemblable que celui-ci soit endommagé par une onde de surpression
9. Eclatement d'une bouteille H ₂	Eclatement de capacité ⇒ Surpression ⇒ Projection de missiles	31 m	Conteneur électrolyseur Conteneur compresseur Tuyauteries d'hydrogène	Endommagement conteneurs électrolyseur et compresseur et mise en sécurité des installations. Tuyauteries : étant donné que le phénomène dangereux initiateur représente une source d'énergie importante, seul le phénomène dangereux domino de jet enflammé est à envisager
10. Eclatement buffer HP	Eclatement de capacité ⇒ Surpression	12 m	Conteneur compresseur Tuyauteries aval compresseur	Endommagement conteneur compresseur et mise en sécurité des installations. Rupture tuyauteries : ER 5 et ER 6 ; étant donné que le phénomène dangereux initiateur

ER	Phénomène dangereux	Distances	Equipements impactés	Scénarios majeurs secondaires
	⇒ Projection de missiles			représente une source d'énergie importante, seul le phénomène dangereux domino de jet enflammé est à envisager

La majorité des scénarios potentiels résultants d'effets dominos internes ont déjà été évalués soit dans l'Evaluation Préliminaire des Risques soit dans l'Analyse Détaillées des Risques : leurs conséquences ont donc déjà été prises en compte.

Il apparaît notamment qu'aucun suraccident dont les effets potentiels seraient susceptibles de dépasser ceux du scénario initiateur n'est identifié.

10.3.2 Etude selon la probabilité

Cette étude permet dans un premier temps de vérifier si un évènement initiateur probable peut entraîner un évènement moins probable du fait des effets dominos. Ensuite, il s'agit de définir le niveau de probabilité final associé à l'évènement.

L'étude a été réalisée de la façon suivante :

- Est-ce que l'évènement initiateur peut créer un phénomène dangereux susceptible de produire des effets dominos (jet enflammé, surpression) ?
- En cas de jet enflammé, une probabilité directionnelle est prise en compte. Classiquement, c'est la valeur 1/6 qui est retenue ;
- Identifier les équipements cibles, et leurs ER associés avec leur probabilité d'occurrence ;
- Si la fréquence de l'évènement initiateur est inférieure à celle de l'effet domino, l'analyse est stoppée ;
- Si la fréquence de l'évènement initiateur est plus élevée, alors la formule suivante est appliquée : $F(ER_i) \times \text{probabilité directionnelle} + F(ER_a) \text{ initiale} = F(ER_a) \text{ finale}$
- Si le niveau de probabilité est différent, alors la case est colorée.

Afin de ne pas alourdir la rédaction, les scénarios de l'étude de dangers dont la classe de probabilité est E ne sont pas présentés dans le tableau suivant.

ER initial (ER _i)	F(PhDi)	PhD	Probabilité directionnelle	Equipements impactés	ER associé (ER _a)	F(ER _a) initiale	F(PhDi)*Proba directionnelle > F(ER _a)	F(ER _a) finale	Niveau de probabilité final	Gravité évalué	Niveau de risque associé	Bilan
ER 3A	1,2. 10 ⁻⁵	Jet enflammé	1/6	Tuyauterie HP en sortie du compresseur	ER 6A-JE	3,7. 10 ⁻⁵	Non	-	-	-	-	Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques
					ER 6B-JE	1,8. 10 ⁻⁵	Non	-	-	-	-	Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques
ER 4	4,4. 10 ⁻⁴	Surpression	1	Tuyauteries	ER 3A-JE, ER 3B-JE, ER 5A-JE, ER5B-JE, ER6A-JE, ER6B-JE	—	Oui	4,4. 10 ⁻⁴	C	-	-	Sans impact sur le niveau de risque
ER 6A	3,7. 10 ⁻⁵	Jet enflammé	1/6	Cylindre de stockage d'H2 Capacité tampon HP	ER 9 ; ER 10	Effet domino déjà intégré aux calculs de fréquence des ER 9 et 10					Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques	
ER 6B	1,8. 10 ⁻⁵	Jet enflammé	1/6	Cylindre de stockage d'H2 Capacité tampon HP	ER 9 ; ER 10	Effet domino déjà intégré aux calculs de fréquence des ER 9 et 10					Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques	
ER 7	2,1. 10 ⁻⁷	Jet enflammé longue durée	1/6	Cylindre de stockage d'H2	ER 9	Effet domino déjà intégré au calcul de fréquence de l'ER 9					Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques	
ER 8	9,4. 10 ⁻⁶	Jet enflammé	1/2	Cylindre de stockage d'H2	ER 9	Effet domino déjà intégré au calcul de fréquence de l'ER 9					Pas de modification des résultats de l'analyse détaillée des risques	

D'après l'étude des effets dominos, il apparaît que les jets enflammés consécutifs aux brèches et ruptures sur tuyauteries (ER 3A, 3B, 5A, 5B, 6A et ER 6B) ont une probabilité qui pourrait être augmentée par effet dominos, passant à une classe de fréquence C. L'événement initiateur associé est l'explosion interne dans le conteneur du compresseur (ER 4). Les effets de surpression du scénario sont susceptibles de libérer une énergie importante engendrant ainsi la brèche ou la rupture des canalisations à proximité et l'inflammation immédiate de l'hydrogène. Les scénarios d'UVCE et de flash-fire nécessitant une inflammation retardée ne sont pas susceptibles d'avoir lieu. Seul le scénario de jet enflammé est dans ce cas réaliste.

Les effets thermiques associés au phénomène dangereux « Jet enflammé » des événements redoutés domino ne dépassent pas les limites de propriété. Cette augmentation de probabilité n'impacte donc pas le niveau de risque final du site Lhyfe de Bessières selon les critères réglementaires.

Aucun autre effet domino modifiant le niveau de risque déjà attribué aux scénarios étudiés en ADR n'a été identifié. Il convient de noter que les effets domino pouvant être à l'origine des ER 9 et 10 ont été intégrés à l'analyse de risque dès le calcul de la fréquence des événements redoutés en ADR.

10.4 Conclusion sur l'analyse des effets dominos

Des effets dominos peuvent avoir lieu entre les différentes installations du site Lhyfe de Bessières.

Comme précisé dans le paragraphe précédent, les équipements impactés ont déjà fait l'objet d'une analyse et ne sont pas susceptibles de provoquer un suraccident et de conduire à de nouveaux effets en dehors des limites de propriété. Le placement des scénarios d'accident étudiés dans la matrice des risques majeurs n'est donc pas modifié.

Il est important de remarquer que plusieurs scénarios étudiés en détail résultent déjà de séquences accidentelles faisant intervenir un effet domino préalable comme cause potentielle.

11 CONCLUSION

Le principal potentiel de danger présent sur le site Lhyfe de Bessières est lié au caractère très inflammable de l'hydrogène produit. Les phénomènes dangereux induits les plus probables sont donc de fait l'incendie et l'explosion.

Dix événements redoutés ont été sélectionnés à l'issue de l'Evaluation Préliminaire des Risques et étudiés en détail dans cette Etude De Dangers. Ils concernent exclusivement des inflammations de fuites alimentées en hydrogène ou des éclatements de capacités sous pression.

Suite à l'évaluation en probabilité et gravité des phénomènes dangereux correspondants, conformément aux principes et aux critères de l'Arrêté Ministériel du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les Etudes De Dangers des installations classées soumises à Autorisation, les résultats du placement de ces derniers dans la matrice réglementaire d'appréciation des risques sont les suivants :

- 5 scénarios situés dans une case MMR Rang 1 :
 - o ER 3A - Petite fuite sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur (Flash-fire),
 - o ER 3B - Rupture de ligne H2 en sortie de l'électrolyseur (Flash-fire),
 - o ER 6B - Rupture de ligne H2 au refoulement des compresseurs (Flash-fire et UVCE)
 - o ER 9 - Eclatement d'une bouteille de stockage d'H2,
- 7 scénarios situés dans une case « acceptable ».

Les mesures de prévention et de mitigation mises en œuvre sur le site Lhyfe de Bessières pour prévenir et/ou limiter la survenue d'accidents industriels potentiels sont par conséquent adaptées au niveau de risque des installations.

Enfin, les effets dominos potentiels sur le site ont été analysés : aucun scénario d'accident n'est susceptible de conduire à une séquence accidentelle supplémentaire non étudiée et par suite à un suraccident.

Ainsi, le niveau de risque généré par les installations du site Lhyfe de Bessières est maintenu à un niveau aussi bas que possible compte-tenu des enjeux à proximité.

Annexe 1 – Hiram+ Version 5.0 Technical Reference Manual – Sandia report SAND2022-16425
Printed November 2022
(2 pages)

Contexte :

HyRAM désigne une approche méthodologique permettant de réaliser des analyses de risques quantitatives sur des installations de stockage et de distribution d'hydrogène. Il s'agit plus précisément d'une « boîte à outils » compilée dans un logiciel intégrant un état de l'art des installations du secteur de l'hydrogène, reposant sur des publications scientifiques et des modèles mathématiques validés, ainsi que des données statistiques récentes.

Cet outil intègre des modèles déterministes et probabilistes pour déterminer les conséquences physiques de phénomènes dangereux propres à l'hydrogène (dispersion inflammable, jet enflammé, explosion) et quantifier le risque relatif aux scénarios d'accidents correspondants.

HyRAM 5.0 propose notamment des données de fréquence de fuite générique sur différents types d'équipements, ainsi que des probabilités d'inflammation. Dans le cadre de l'Etude De Dangers du site Lhyfe de Bessières, seul le volet « probabiliste » pour les différents types d'équipements de l'outil HyRAM a été utilisé : les modélisations des différents phénomènes dangereux ont été réalisées à l'aide du logiciel PHAST, développé par DNV Technica, largement reconnu par la profession et ayant fait l'objet de nombreux cas de validation, y compris pour l'hydrogène. Par ailleurs, l'approche adoptée dans l'étude de dangers pour estimer les probabilités d'inflammation diffère de celle présentée dans l'outil Hyram.

Plusieurs auteurs impliqués dans la rédaction des standards de sécurité pour les technologies relatives à l'hydrogène, NFPA 2 – Hydrogen Technologies Code et International Organization for Standards' Technical Report TR-19880-1, ont activement participé à l'élaboration de la méthodologie HyRAM. La version publique initiale, HyRAM 1.0, a été diffusée en 2016.

Depuis, l'outil a fait l'objet de développements additionnels permettant d'améliorer et d'affiner la précision des résultats.

Dans l'outil HyRAM, les systèmes susceptibles de contenir de l'hydrogène sont découpés en familles d'équipements. Sur la base du nombre de chaque type d'équipement présent et de la longueur des canalisations considérées, l'utilisateur peut alors estimer la fréquence de fuite d'un système.

En outre, les fuites sur équipements sont discrétisées en 5 catégories, relatives à une fraction de la section de passage dans l'équipement : 0.01%, 0.1%, 1%, 10%, 100%.

Le tableau de la page suivante résume les valeurs de fréquence de fuite proposées dans l'outil HyRAM.

Table 2-2 Default parameters for frequency of random leaks for individual components.

Component	Leak Size	Gaseous Hydrogen			Liquid Hydrogen			Gaseous Methane			Liquid Methane			Propane		
		μ	σ	median	μ	σ	median	μ	σ	median	μ	σ	median	μ	σ	median
Compressor	0.01%	-2.3	0.3	1.0×10^{-1}	999	999	∞	-1.7	1.0	1.9×10^{-1}	999	999	∞	0.8	1.3	$2.2 \times 10^{+0}$
	0.1%	-4.1	0.5	1.7×10^{-2}	999	999	∞	-3.6	0.8	2.8×10^{-2}	999	999	∞	-2.2	1.0	1.1×10^{-1}
	1%	-5.4	0.8	4.6×10^{-3}	999	999	∞	-5.5	0.6	4.1×10^{-3}	999	999	∞	-5.3	1.0	5.2×10^{-3}
	10%	-8.8	0.7	1.5×10^{-4}	999	999	∞	-7.4	0.6	6.0×10^{-4}	999	999	∞	-8.3	0.7	2.6×10^{-4}
	100%	-11.1	1.2	1.5×10^{-5}	999	999	∞	-9.3	0.7	8.8×10^{-5}	999	999	∞	-11.3	1.2	1.2×10^{-5}
Vessel (Tank/Cylinder)	0.01%	-13.5	0.7	1.4×10^{-6}	-7.3	1.8	6.5×10^{-4}	-3.6	1.2	2.6×10^{-2}	-7.6	1.1	4.8×10^{-4}	-0.4	1.3	6.6×10^{-1}
	0.1%	-13.6	0.6	1.2×10^{-6}	-8.9	2.6	1.4×10^{-4}	-4.8	0.9	7.8×10^{-3}	-8.9	2.2	1.4×10^{-4}	-3.9	1.0	2.0×10^{-2}
	1%	-14.1	0.6	7.9×10^{-7}	-10.5	2.1	2.8×10^{-5}	-6.1	0.7	2.3×10^{-3}	-10.1	1.9	3.9×10^{-5}	-7.4	0.8	6.4×10^{-4}
	10%	-14.6	0.6	4.5×10^{-7}	-12.1	2.7	5.7×10^{-6}	-7.3	0.6	6.8×10^{-4}	-11.4	2.4	1.1×10^{-5}	-10.9	0.7	1.9×10^{-5}
	100%	-15.3	0.6	2.3×10^{-7}	-13.7	3.1	1.2×10^{-6}	-8.5	0.9	2.0×10^{-4}	-12.7	3.2	3.1×10^{-6}	-14.3	0.7	6.1×10^{-7}
Filter	0.01%	-5.2	1.7	5.3×10^{-3}	999	999	∞	-1.2	0.9	3.0×10^{-1}	999	999	∞	-5.2	1.7	5.3×10^{-3}
	0.1%	-5.3	1.3	5.1×10^{-3}	999	999	∞	-2.2	0.8	1.1×10^{-1}	999	999	∞	-5.3	1.3	5.1×10^{-3}
	1%	-5.3	1.3	4.8×10^{-3}	999	999	∞	-3.2	0.6	4.0×10^{-2}	999	999	∞	-5.3	1.3	4.8×10^{-3}
	10%	-5.4	0.7	4.6×10^{-3}	999	999	∞	-4.2	0.6	1.5×10^{-2}	999	999	∞	-5.4	0.7	4.6×10^{-3}
	100%	-5.4	0.8	4.4×10^{-3}	999	999	∞	-5.2	0.6	5.5×10^{-3}	999	999	∞	-5.4	0.8	4.4×10^{-3}
Flange	0.01%	-3.9	1.5	2.0×10^{-2}	-3.9	1.5	2.0×10^{-2}	-2.4	1.2	8.7×10^{-2}	-10.1	0.7	4.2×10^{-5}	-3.9	1.5	2.0×10^{-2}
	0.1%	-6.1	1.1	2.2×10^{-3}	-6.1	1.1	2.2×10^{-3}	-4.7	0.9	8.7×10^{-3}	-10.7	1.2	2.3×10^{-5}	-6.1	1.1	2.2×10^{-3}
	1%	-8.3	2.1	2.4×10^{-4}	-8.3	2.1	2.4×10^{-4}	-7.0	0.7	8.8×10^{-4}	-11.2	2.4	1.4×10^{-5}	-8.3	2.1	2.4×10^{-4}
	10%	-10.5	0.7	2.7×10^{-5}	-10.5	0.7	2.7×10^{-5}	-9.3	0.6	8.8×10^{-5}	-11.7	2.8	8.6×10^{-6}	-10.5	0.7	2.7×10^{-5}
	100%	-12.7	1.7	2.9×10^{-6}	-12.7	1.7	2.9×10^{-6}	-11.6	0.7	9.2×10^{-6}	-12.2	2.9	5.2×10^{-6}	-12.7	1.7	2.9×10^{-6}
Hose	0.01%	-7.5	0.4	5.8×10^{-4}	-7.5	0.4	5.8×10^{-4}	-10.5	1.2	2.8×10^{-5}	-13.4	0.7	1.5×10^{-6}	2.5	1.3	$1.3 \times 10^{+1}$
	0.1%	-8.5	0.6	2.0×10^{-4}	-8.5	0.6	2.0×10^{-4}	-9.3	0.9	9.1×10^{-5}	-11.7	0.6	7.9×10^{-6}	0.3	0.9	$1.4 \times 10^{+0}$
	1%	-8.7	0.6	1.6×10^{-4}	-8.7	0.6	1.6×10^{-4}	-8.2	0.7	2.9×10^{-4}	-10.1	4.2	4.1×10^{-5}	-1.8	0.8	1.6×10^{-1}
	10%	-8.8	0.6	1.5×10^{-4}	-8.8	0.6	1.5×10^{-4}	-7.0	0.6	9.1×10^{-4}	-8.5	0.9	2.1×10^{-4}	-4.1	0.7	1.7×10^{-2}
	100%	-9.7	1.0	6.2×10^{-5}	-9.7	1.0	6.2×10^{-5}	-5.8	0.7	2.9×10^{-3}	-6.8	3.6	1.1×10^{-3}	-6.2	1.4	2.0×10^{-3}
Joint	0.01%	-10.3	0.2	3.5×10^{-5}	-10.3	0.2	3.5×10^{-5}	0.5	1.1	$1.6 \times 10^{+0}$	10.5	2.2	$3.5 \times 10^{+4}$	-0.6	1.3	5.3×10^{-1}
	0.1%	-12.3	0.9	4.7×10^{-6}	-12.3	0.9	4.7×10^{-6}	-1.5	0.8	2.3×10^{-1}	6.2	1.7	$4.8 \times 10^{+2}$	-2.3	1.0	1.0×10^{-1}
	1%	-11.8	0.5	7.9×10^{-6}	-11.8	0.5	7.9×10^{-6}	-3.4	0.6	3.2×10^{-2}	1.9	1.1	$6.5 \times 10^{+0}$	-4.0	1.0	1.8×10^{-2}
	10%	-11.8	0.6	7.5×10^{-6}	-11.8	0.6	7.5×10^{-6}	-5.4	0.5	4.6×10^{-3}	-2.4	0.7	8.8×10^{-2}	-5.6	0.6	3.5×10^{-3}
	100%	-12.0	0.7	6.4×10^{-6}	-12.0	0.7	6.4×10^{-6}	-7.3	0.6	6.6×10^{-4}	-6.7	0.6	1.2×10^{-3}	-7.4	0.7	6.3×10^{-4}
Pipe	0.01%	-11.7	0.7	8.0×10^{-6}	-11.7	0.7	8.0×10^{-6}	-2.5	1.2	8.1×10^{-2}	-12.8	1.3	2.7×10^{-6}	-7.9	1.0	3.6×10^{-4}
	0.1%	-12.5	0.7	3.7×10^{-6}	-12.5	0.7	3.7×10^{-6}	-4.2	0.9	1.5×10^{-2}	-13.4	1.4	1.4×10^{-6}	-9.7	0.8	6.2×10^{-5}
	1%	-13.9	1.3	9.6×10^{-7}	-13.9	1.3	9.6×10^{-7}	-5.9	0.9	2.7×10^{-3}	-14.1	1.2	7.9×10^{-7}	-11.4	1.5	1.1×10^{-5}
	10%	-14.6	1.2	4.6×10^{-7}	-14.6	1.2	4.6×10^{-7}	-7.6	0.6	5.0×10^{-4}	-14.7	1.4	4.2×10^{-7}	-13.2	1.3	1.9×10^{-6}
	100%	-15.7	1.8	1.5×10^{-7}	-15.7	1.8	1.5×10^{-7}	-9.3	0.9	9.1×10^{-5}	-15.3	1.8	2.3×10^{-7}	-14.9	2.1	3.2×10^{-7}
Valve	0.01%	-5.9	0.2	2.9×10^{-3}	-5.9	0.2	2.9×10^{-3}	-3.0	1.1	5.1×10^{-2}	-9.4	0.7	8.4×10^{-5}	-4.5	1.0	1.2×10^{-2}
	0.1%	-7.4	0.4	5.9×10^{-4}	-7.4	0.4	5.9×10^{-4}	-3.9	0.8	2.0×10^{-2}	-10.1	1.0	4.2×10^{-5}	-6.3	0.8	1.9×10^{-3}
	1%	-9.8	1.1	5.4×10^{-5}	-9.8	1.1	5.4×10^{-5}	-4.9	1.4	7.8×10^{-3}	-10.7	1.2	2.2×10^{-5}	-8.1	1.5	3.1×10^{-4}
	10%	-10.6	0.6	2.5×10^{-5}	-10.6	0.6	2.5×10^{-5}	-5.8	0.6	3.0×10^{-3}	-11.3	1.9	1.2×10^{-5}	-9.9	0.6	5.3×10^{-5}
	100%	-12.2	1.4	4.8×10^{-6}	-12.2	1.4	4.8×10^{-6}	-6.8	1.2	1.2×10^{-3}	-11.9	1.9	6.5×10^{-6}	-11.7	1.4	8.5×10^{-6}
Instrument	0.01%	-7.4	0.7	6.2×10^{-4}	999	999	∞	-7.3	0.7	6.9×10^{-4}	999	999	∞	999	999	∞
	0.1%	-8.5	0.8	2.0×10^{-4}	999	999	∞	-8.1	0.6	3.0×10^{-4}	999	999	∞	999	999	∞
	1%	-9.1	0.9	1.1×10^{-4}	999	999	∞	-8.9	0.6	1.3×10^{-4}	999	999	∞	999	999	∞
	10%	-9.2	1.1	1.0×10^{-4}	999	999	∞	-9.8	0.5	5.7×10^{-5}	999	999	∞	999	999	∞
	100%	-10.2	1.5	3.7×10^{-5}	999	999	∞	-10.6	0.7	2.5×10^{-5}	999	999	∞	999	999	∞
Heat Exchanger	0.01%	999	999	∞	999	999	∞	0.6	1.3	$1.8 \times 10^{+0}$	-6.1	1.0	2.3×10^{-3}	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞	-1.1	1.0	3.5×10^{-1}	-7.0	1.3	8.9×10^{-4}	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞	-2.7	1.1	6.7×10^{-2}	-8.0	1.4	3.2×10^{-4}	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞	-4.4	0.6	1.3×10^{-2}	-9.1	2.3	1.2×10^{-4}	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞	-6.0	0.9	2.4×10^{-3}	-10.1	1.6	4.2×10^{-5}	999	999	∞
Vaporizer	0.01%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-4.8	2.5	8.1×10^{-3}	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-3.6	1.9	2.6×10^{-2}	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-2.5	1.2	8.4×10^{-2}	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-1.3	0.7	2.7×10^{-1}	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-0.1	0.7	8.8×10^{-1}	999	999	∞
Transfer Arm	0.01%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-1.6	3.0	2.0×10^{-1}	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-4.4	2.1	1.2×10^{-2}	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-7.2	1.9	7.5×10^{-4}	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-10.3	1.0	3.3×10^{-5}	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞	999	999	∞	-12.7	3.4	3.0×10^{-6}	999	999	∞

Annexe 2 – Déclaration de conformité de l'électrolyseur
(2 pages)

EU Declaration of Conformity

Product: 5MW Hydrogen electrolyzer
Type: EX-2125D
Serial: 2021EX2125D00006
Manufacturer: Frames Renewable Energy Solutions B.V.
Tradename: Plug Power, the Netherlands
Address: Eikenlaan 237, 2404BP, Alphen aan den Rijn, the Netherlands
Telephone Nr.: +31 172 461 600
Email address: ELX_CE@plugpower.com
Website: www.plugpower.com

This declaration of conformity is issued under the sole responsibility of the manufacturer.

The object of the declaration described above is in conformity with the relevant Union harmonization and the following harmonized standards and/or other normative documents have been applied:

Directive	Relating:	Standards Applied
2014/68/EU	Pressure Equipment	EN 764-7:2002/AC:2006 EN IEC 61511:2017 ASME VIII Div.1
2006/42/EC	Machinery	EN ISO 12100:2010 EN 60204-1:2018 EN 1127-1:2019 EN 14460:2018

The following conformity assessment modules have been applied:

Module	Notified Body-Nr.	Certificate nr.
Module B (PED)	LRQA-0343	5000877
Module F (PED)	LRQA-0343	6013275/1
Module A (MD)	N/a	N/a

Signed for and on behalf of:

Alphen aan den Rijn 08 / 05 / 2024


Jordi Zonneveld, Managing Director (Vice President, the Netherlands)

Annex I

Clarifications to the EU Declaration of Conformity

1 ExPSR

Inside the product the occurrence of a potential explosive process atmosphere and the presence of an ignition source cannot be avoided. The process atmosphere is not covered by the ATEX directives, and an explosion incident is not covered by PED. Therefore, only the MD applies to this hazard. Based on the EN 1127-1 methodology, the product contains a protective system designed to limit the effective range of an internal explosion to a sufficient level of safety, which is proven explosion pressure shock resistant (ExPSR) in line with EN 14460:2018.

The protective system has interfaces with potentially explosive atmospheres. It is placed on the market as an integral part of the product, hence no CE marking is required. Conformity to the 2014/34/EU essential health and safety requirements is demonstrated by internal production control (Annex VIII), following category 3 requirements.

2 2014/30/EU Electromagnetic compatibility

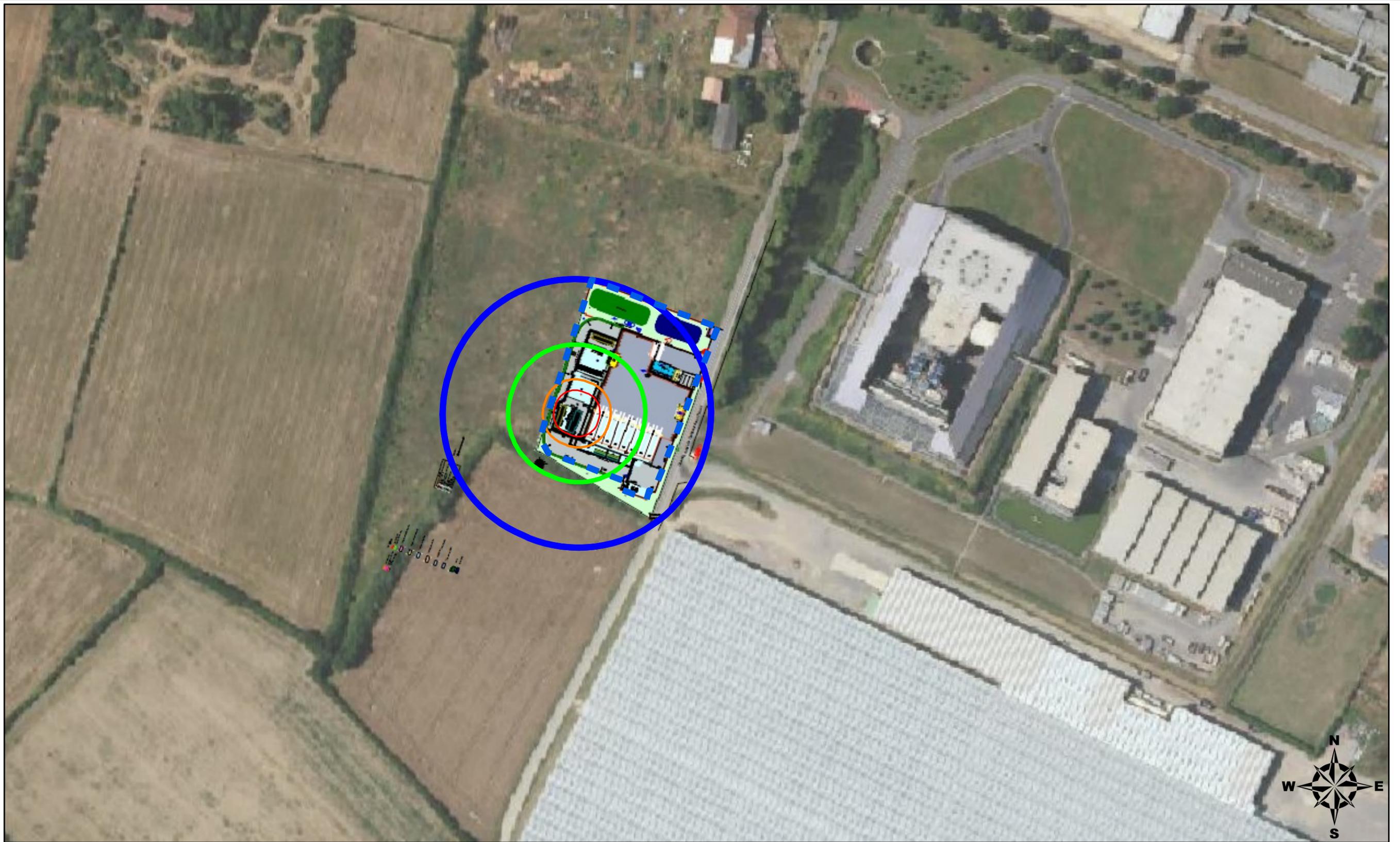
The product is classified as a fixed installation under the 2014/30/EU EMC directive. All components have been installed using good engineering practices as per essential requirements applicable for fixed installations (Annex I, point 2).

3 Components

The following single components have been declared to specific directives. For details, reference is made to the component specific user manual and declaration of conformity.

Directive	Relating:	Component(s)
2014/29/EU	Simple pressure vessels	Compressed air package
2014/53/EU	Radio Equipment	IXrouter3 (Local control panel)

Annexe 3 – Cartographie des effets thermiques et de surpression
(16 pages)



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets de surpression

ER 1: Effets de surpression Explosion séparateur anode

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

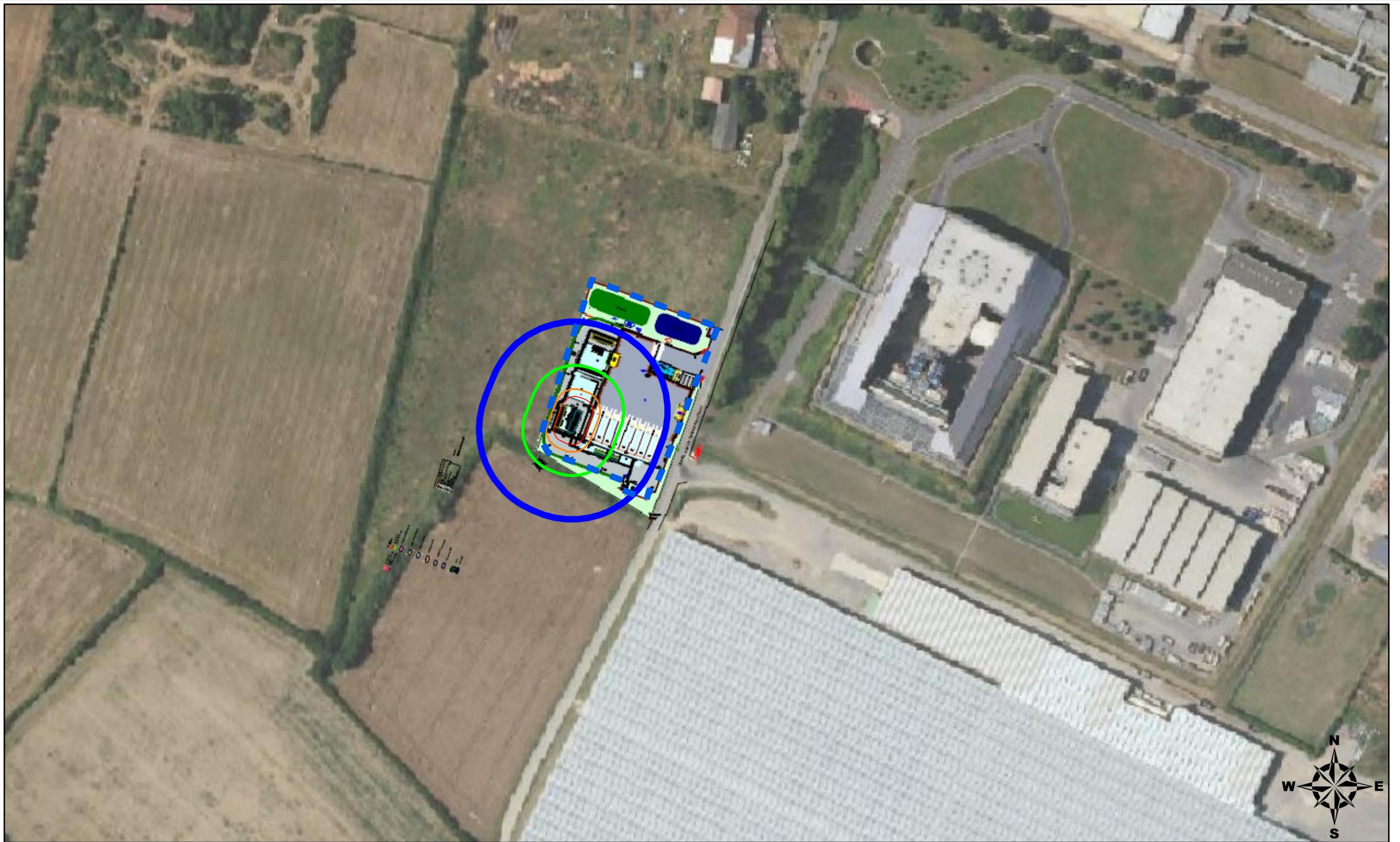
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
8

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER2- Effets de surpression Fuite d'Hydrogène et explosion du container de l'électrolyseur

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
9

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 3A – effets thermiques (phase 1)
 Petite fuite sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur - Flash fire

Légende

- SEI (1,1x distance à la LIE)
- SEL/SELS (distance à la LIE)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

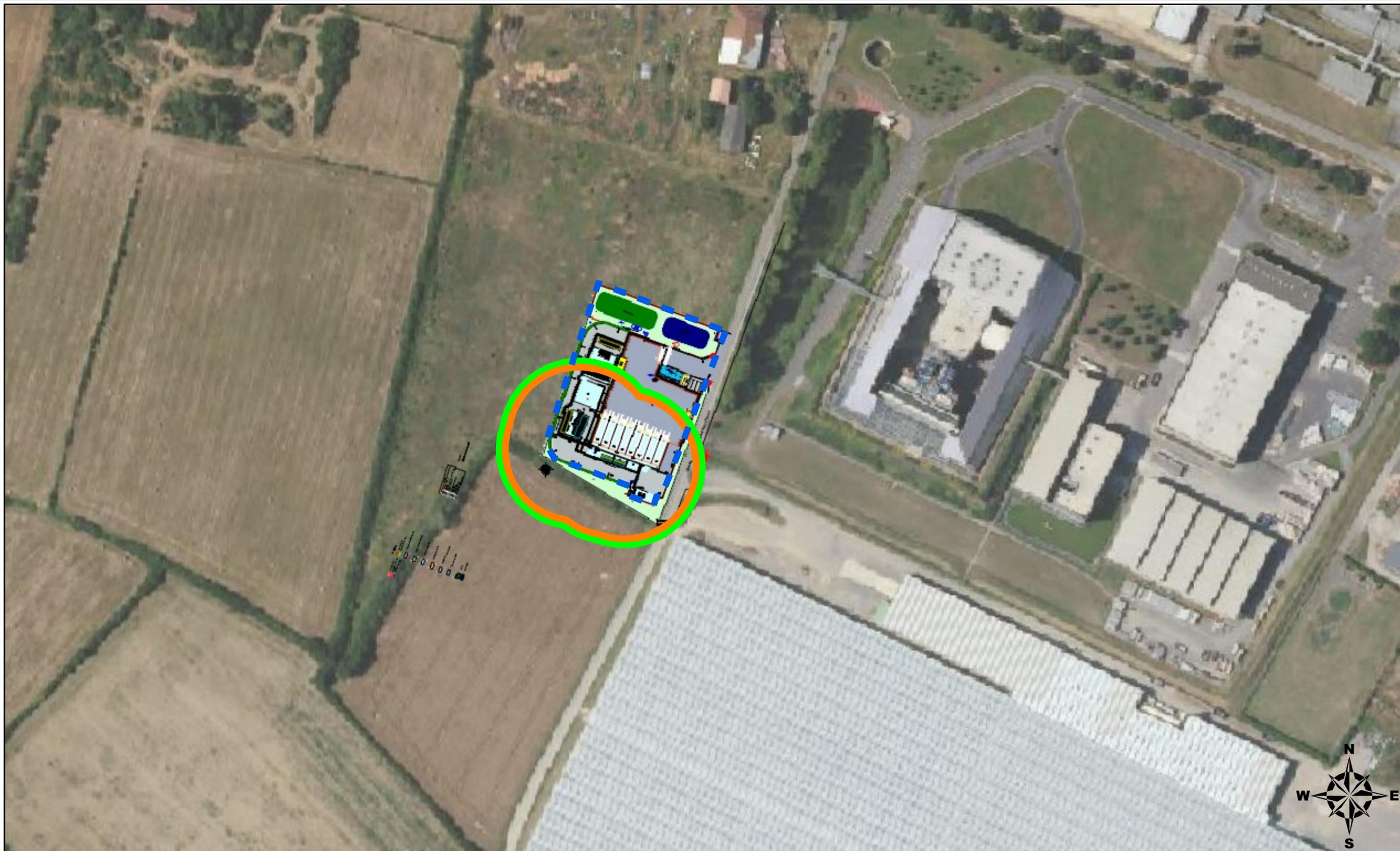
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
1

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 3B – effets thermiques (phase 1)
Rupture sur circuit H2 en sortie de l'électrolyseur - Flash fire

Légende

- SEI (1,1x distance à la LIE)
- SEL/SELS (distance à la LIE)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

2

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER4 - Effets de surpression Fuite d'Hydrogène et explosion du container des compresseurs

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

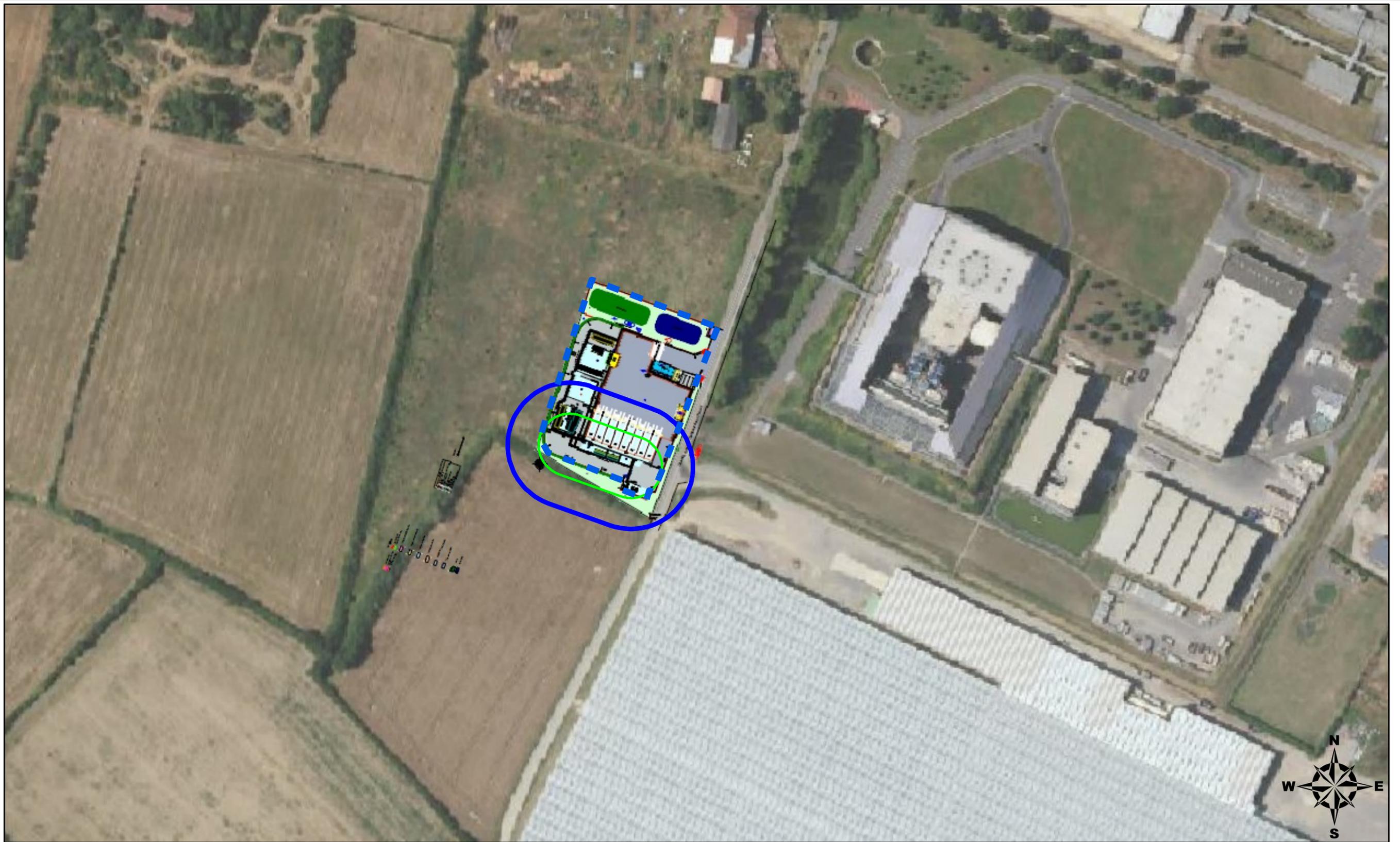
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
10

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER5 - Effets de surpression
Rupture de ligne H2 au refoulement des compresseurs _UVCE

Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

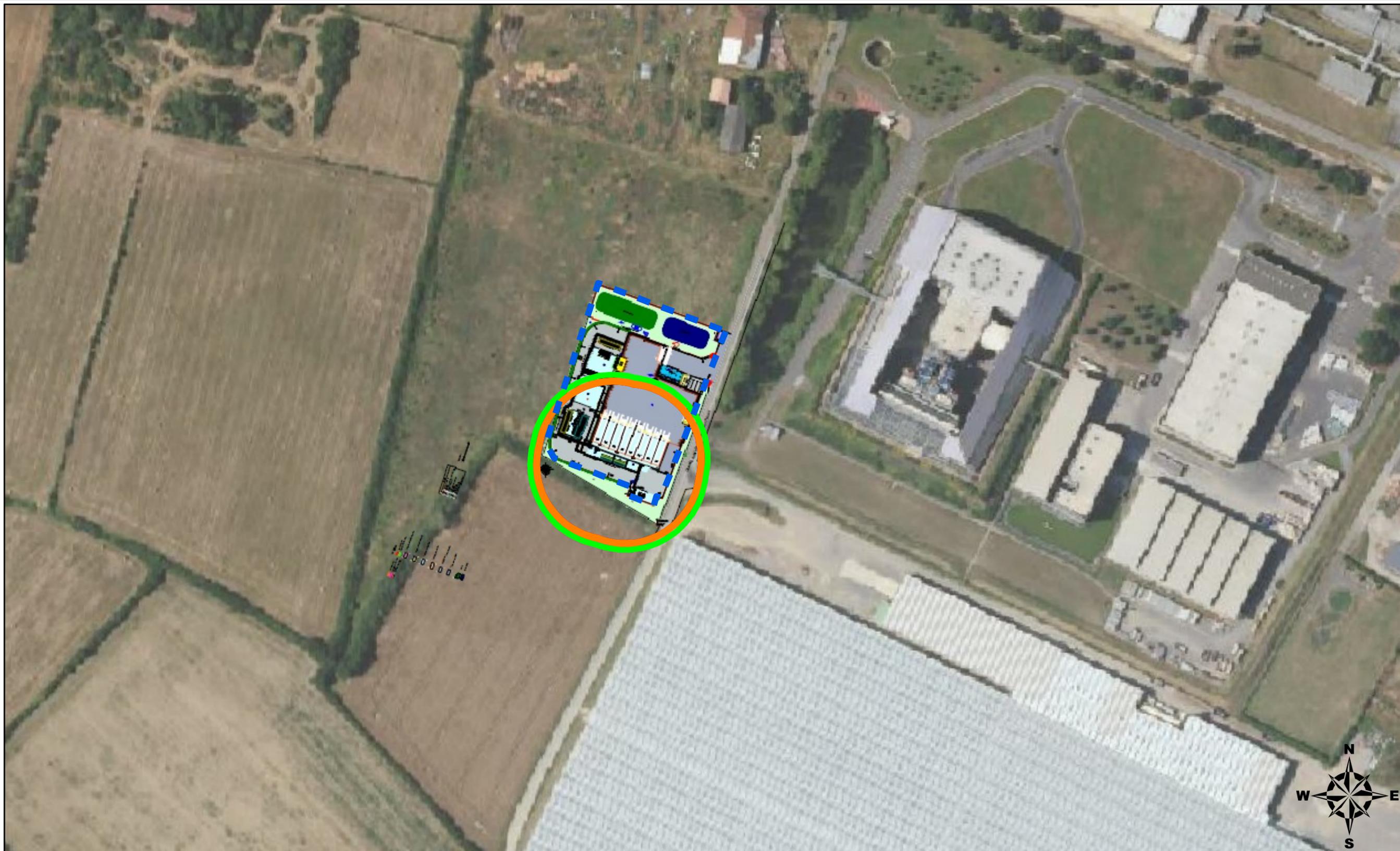
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
11

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 6B – effets thermiques (phase 1)
Rupture sur circuit H2 en sortie du compresseur - Flash fire

Légende

- SEI (1,1 x distance à la LIE)
- SEL/SELS (distance à la LIE)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

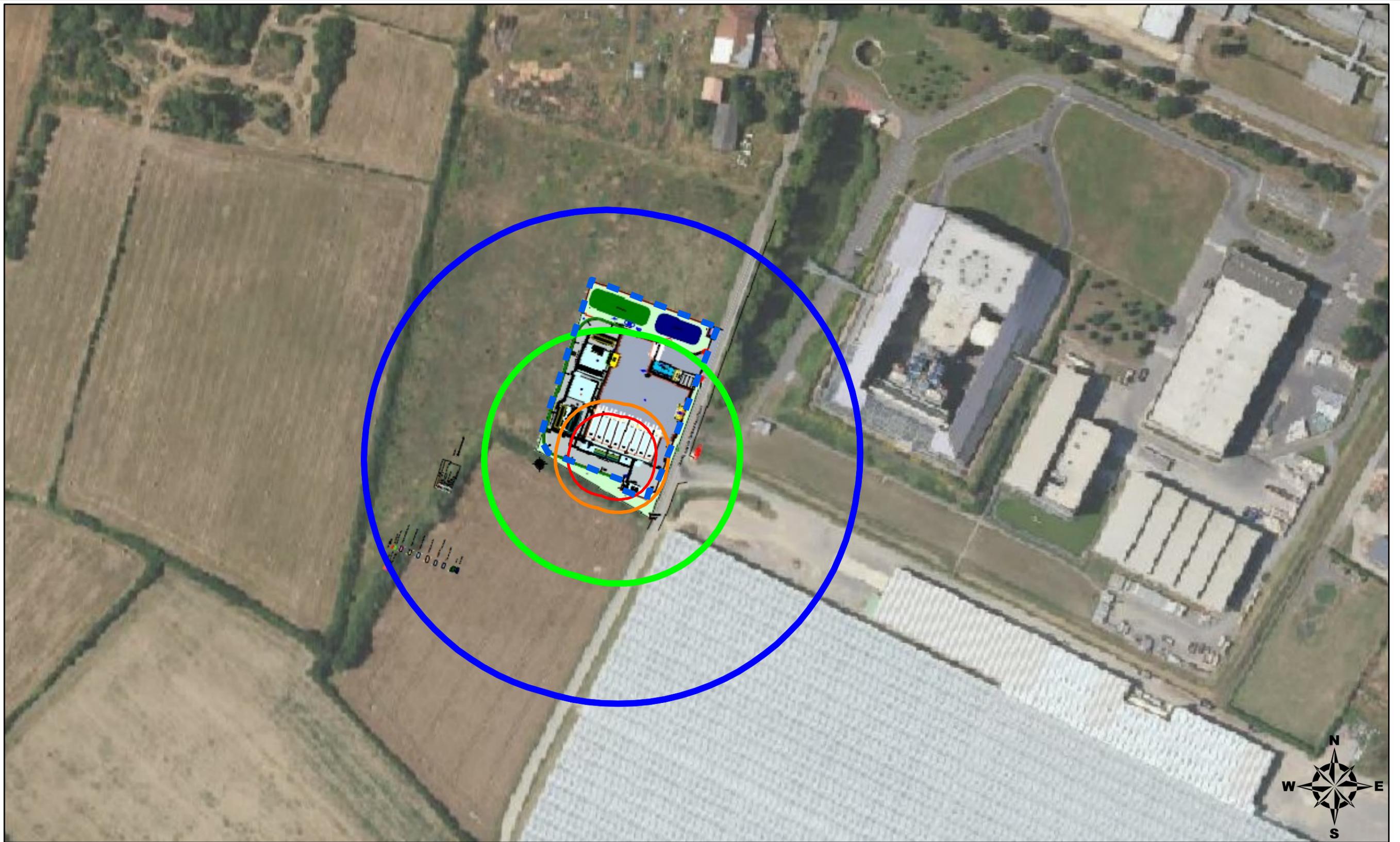
N° Ordre

3

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets thermiques et de surpression

**ER 5 - Effets de surpression
Rupture de ligne H2 au refoulement des compresseurs - UVCE**

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

12

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de suppression

ER7 - Effets thermique - jet enflammé
Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène

Légende

- SEI Thermique (3 kW/m²)
- SEL Thermique (5 kW/m²)
- SELS Thermique (8 kW/m²)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 18/10/24

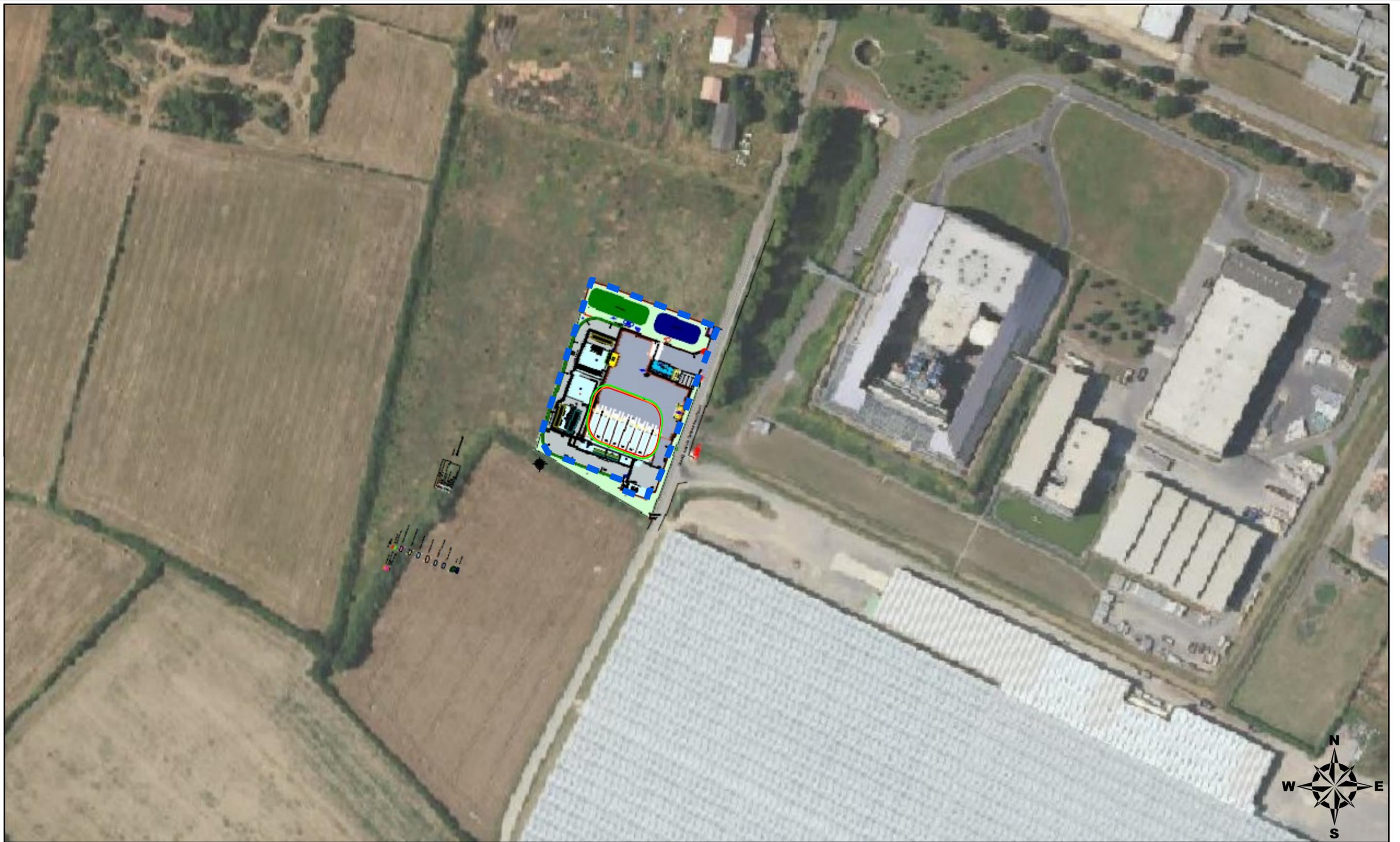
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
6

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de suppression

ER 7 - Effets thermique - Flash fire
Rupture de flexible au niveau d'un conteneur d'hydrogène

Légende

- SEI Thermique (3 kW/m²)
- SEL Thermique (5 kW/m²)
- SELS Thermique (8 kW/m²)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 18/10/24

N° Contrat
5232

Document

N° Ordre

7

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 8 - Effets thermique - Jet enflammé
Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres

Légende

- SEI Thermique (3 kW/m²)
- SEL Thermique (5 kW/m²)
- SELS Thermique (8 kW/m²)

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

4

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 8 - Effets de surpression
Fuite au niveau de la ligne d'alimentation des cylindres - Explosion dans un trailer

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

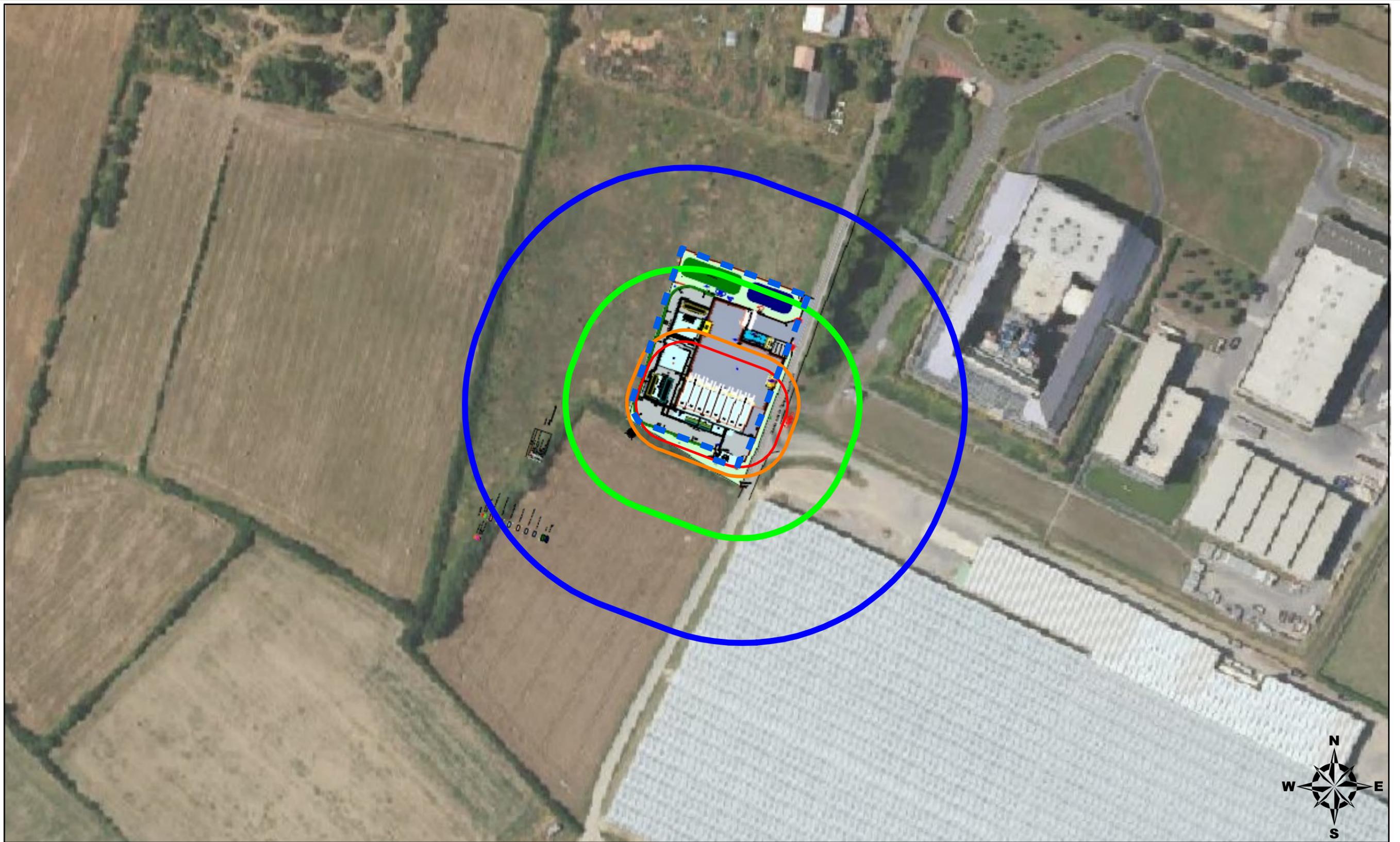
N° Contrat
5232

Document

N° Ordre
13

Rev:
A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographie des effets thermiques et de surpression

Scenario de surpression 9
Eclatement d'une bouteille de stockage d'H2

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 21/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

14

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographies des effets thermiques et de surpression

ER 10 - Effets de surpression Eclatement buffer HP

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

15

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Cartographies des effets thermiques et de surpression

Légende

- SEI Thermique (3 kW/m²)
- SEL Thermique (5 kW/m²)
- SELS Thermique (8 kW/m²)

Enveloppe des effets thermiques

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 17/10/24

N° Contrat

5232

Document

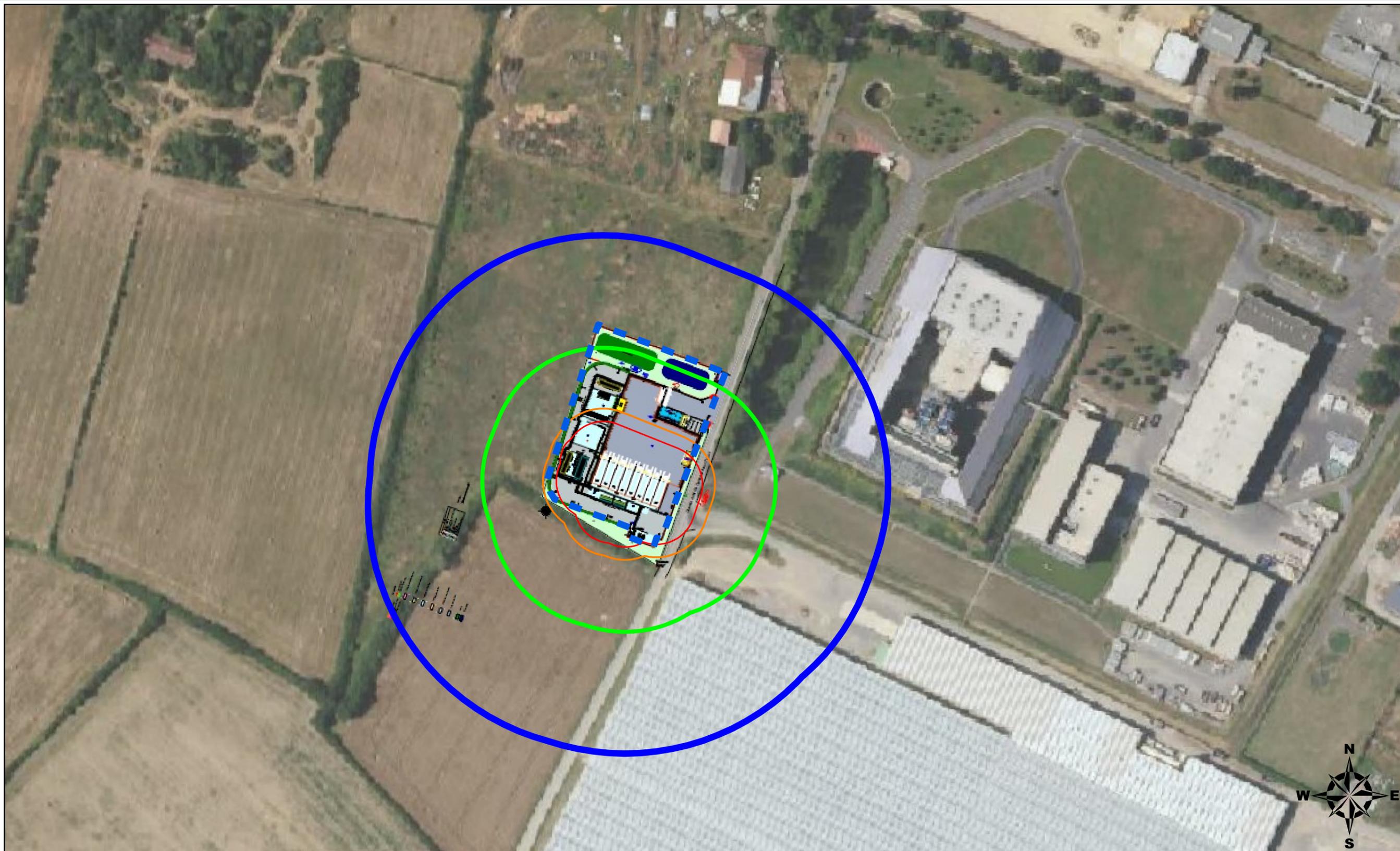
N° Ordre

Th

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.



Légende

- SER Surpression (20 mbar)
- SEI Surpression (50 mbar)
- SEL Surpression (140 mbar)
- SELS Surpression (200 mbar)

Cartographie des effets thermiques et de surpression

Enveloppe des effets de surpression

A3

Echelle: 1/2 000

Dessinateur : SGA

Date: 22/10/24

N° Contrat

5232

Document

N° Ordre

Su

Rev:

A

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être recopié ou reproduit sans notre autorisation.