

CEE-ONU

Évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels



NATIONS UNIES

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

Évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels

Aperçu des méthodes d'évaluation des risques,
Études de cas et outils logiciels



NATIONS UNIES

Genève, 2023

© 2023 Nations Unies
Tous droits réservés.

Les demandes de reproduction ou de photocopie d'extraits de la présente publication doivent être adressées au Copyright Clearance Center depuis le site Web copyright.com.

Pour tout autre renseignement concernant les droits et licences, y compris les droits dérivés, s'adresser à :

United Nations Publications
405 East 42nd Street, S-09FW001
New York, NY 10017
États-Unis d'Amérique
Courriel : permissions@un.org
Site Web : <https://shop.un.org>

Les observations, interprétations et conclusions exprimées dans la présente publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'Organisation des Nations Unies, de ses fonctionnaires ou des États Membres.

Le présent document est publié en anglais, en français et en russe.

Les liens qui figurent dans la présente publication sont fournis pour la commodité du lecteur et leur fiabilité est confirmée à la date de parution. L'Organisation des Nations Unies décline toute responsabilité quant à l'exactitude de ces informations à un stade ultérieur ou au contenu de tout site Web externe.

Conception graphique de la couverture : Commission économique pour l'Europe

Publication des Nations Unies établie par la Commission économique pour l'Europe

Crédits photos : page de couverture, quatrième de couverture et pages 2, 30 et 60

– Depositphotos

ECE/CP.TEIA/45

PUBLICATION DES NATIONS UNIES
e-ISBN : 978-92-1-002514-0

Avant-propos

Les accidents industriels peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur les populations, l'environnement et l'économie. En 2020, l'explosion d'un entrepôt du port de Beyrouth (Liban), qui contenait quelque 2 750 tonnes de nitrate d'ammonium, a fait environ 300 morts, 6 500 blessés et 300 000 déplacés. Des infrastructures critiques (installations portuaires et sanitaires), de même que des zones résidentielles et commerciales, ont aussi été gravement endommagées. Cet accident industriel dévastateur est venu s'ajouter à une liste déjà bien longue, comprenant notamment l'explosion d'une usine à Toulouse, en France (2001), l'explosion qui s'est produite à Mihăilești, en Roumanie (2004), l'explosion d'un dépôt d'engrais azotés au Texas, aux États-Unis d'Amérique (2013), l'explosion survenue à Tianjin, en Chine (2015) et les explosions qui ont eu lieu à Bata, en Guinée équatoriale (2021). Ces accidents sont autant de rappels pressants de la nécessité qu'il y a à mieux comprendre et appliquer les instruments et outils d'évaluation des risques pour améliorer la prévention.

Les États membres de la Commission économique pour l'Europe (CEE) ont mis au point des instruments juridiques et des moyens d'action internationaux destinés à aider les pouvoirs publics, les exploitants d'installations industrielles, les experts et le public à renforcer la sécurité industrielle. La Convention de la CEE sur les effets transfrontières des accidents industriels vise à protéger les populations et l'environnement grâce à la réduction de la fréquence, de la gravité et des conséquences de ce type d'accidents. Elle prévoit des mesures destinées à prévenir les accidents industriels, y compris ceux provoqués par des catastrophes naturelles et ceux ayant des effets transfrontières, à s'y préparer et à y faire face, ainsi qu'à favoriser la coopération internationale entre ses 42 Parties, voire au-delà. Les Parties sont convenues que l'évaluation des risques était un élément essentiel de la prévention.

La présente publication vient enrichir les connaissances sur l'évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels dans la région de la CEE et au-delà. La première partie donne un aperçu des méthodes d'évaluation des risques existantes. Les décideurs sont invités à s'y rapporter au moment de choisir la méthode à appliquer. La seconde partie présente des études de cas portant sur l'application de plusieurs de ces méthodes. Certaines d'entre elles concernent des accidents susceptibles d'avoir des effets transfrontières et illustrent des cas où plusieurs pays utilisent les mêmes méthodes d'évaluation des risques et la même terminologie. La présente publication compile ainsi des données d'expérience. Les lecteurs sont invités à s'y référer pour procéder à des évaluations efficaces des risques et pour s'assurer qu'il est tenu compte des résultats de ces évaluations dans le choix des sites, dans les mesures de sécurité, dans la planification des interventions d'urgence et dans les informations communiquées au public, entre autres.

La prévention des accidents industriels, qui passe notamment par l'application de la Convention et l'évaluation des risques qu'elle prévoit, concourt à la réalisation, par les États membres, du Programme de développement durable à l'horizon 2030. Elle concourt également à la réduction des risques de catastrophe technologique dans le contexte du Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030). Je suis convaincue que la présente publication contribuera, dans la région de la CEE et au-delà, à améliorer la sécurité industrielle, à renforcer la coopération transfrontière et à protéger les populations et l'environnement contre les effets des accidents industriels.



Tatiana Molcean
Secrétaire générale adjointe de l'ONU,
Secrétaire exécutive de la Commission économique pour l'Europe

Contexte et remerciements

La présente publication a été élaborée dans le cadre de la Convention de la Commission économique pour l'Europe (CEE) sur les effets transfrontières des accidents industriels. La Conférence des Parties à la Convention est convenue que l'évaluation des risques était importante aux fins de l'application de la Convention. Des membres du Bureau de la Convention, du Groupe de travail de l'application et du secrétariat ont créé le groupe restreint de l'évaluation des risques et ont organisé, sous la direction de la Suisse, un séminaire sur les méthodes d'évaluation des risques (Genève, 4 décembre 2018), dont l'objectif était d'aider les États membres de la CEE à appliquer les dispositions de la Convention et à faciliter l'échange d'informations et le partage d'expériences sur l'application des méthodes d'évaluation des risques. Les participants au séminaire ont notamment recommandé la réalisation d'une étude sur l'évaluation des risques, étant donné que de nombreux pays rencontraient des difficultés à mener à bien des évaluations transfrontières et à partager des connaissances et des informations sur les méthodes utilisées.

À sa onzième réunion (Genève et en ligne, 7-9 décembre 2020), la Conférence des Parties a demandé au Bureau de décider des activités à mener comme suite au séminaire. Le groupe restreint de l'évaluation des risques a été reconstitué et, avec l'aide d'un contractant, il a élaboré deux rapports : le premier portait sur les méthodes d'évaluation des risques et les outils logiciels disponibles, tandis que le second compilait des études de cas concernant l'application de méthodes d'évaluation des risques dans différents pays. Ces études de cas ont été généreusement soumises par l'Allemagne, l'Estonie, la Finlande, la France, la Hongrie, la Lettonie, la Norvège, les Pays-Bas, la Serbie, la Slovaquie, la Suède et la Suisse. Le groupe restreint était composé des membres suivants : Michael Struckl (Autriche), Evgeny Baranovsky (Biélorussie), Laura Vizbule (Lettonie), Sanja Stamenkovic (Serbie), Suzana Milutinovic (Serbie), Jasmina Karba (Slovaquie), Martin Merkofer (responsable, Suisse), Raphael Gonzalez (Suisse) et Claudia Kamke (secrétariat). Il a fait appel au contractant Jensen Hughes (Jeremy Lebowitz, Purvali Chaudhari et Kamal Aljazireh), qui l'a appuyé dans l'élaboration des rapports. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) de la Suisse a apporté son soutien financier.

À sa douzième réunion (Genève et en ligne, 29 novembre-1^{er} décembre 2022), la Conférence des Parties a pris note des rapports et demandé au secrétariat de les publier au cours de l'exercice biennal 2023-2024 en tant que publication des Nations Unies dans les trois langues officielles de la CEE. Le secrétariat a établi la présente publication après avoir rédigé, révisé et parachevé les deux rapports. Les membres du personnel de la CEE ci-après ont contribué à l'élaboration des rapports et/ou de la présente publication : Franziska Hirsch, Georgios Georgiadis, Claudia Kamke (chargée de la rédaction des rapports), Yelyzaveta Rubach, Joseph Orangias (chargé de la publication) et Olga Carlos. Max Linsen, consultant auprès du secrétariat, a contribué à l'élaboration des rapports. Eunsong Cho et Giorgia Monsignori, stagiaires du secrétariat, ont participé à l'établissement de la présente publication, rendu possible grâce au soutien financier de l'OFEV (Suisse).

L'OFEV (Suisse), le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (France), la Direction générale nationale de la gestion des catastrophes (Hongrie), la Direction norvégienne de la protection civile (Norvège), le Pôle d'analyse des risques du Centre scientifique et technique sur la sécurité industrielle (Fédération de Russie) et l'Agence suédoise pour la protection civile (Suède), ainsi que l'American Institute of Chemical Engineers, l'Institut de chimie du Canada (Conseil canadien des accidents industriels majeurs), DepositPhotos, le groupe Elsevier et les éditions Wiley ont autorisé l'utilisation des images figurant dans cette publication.

Table des matières

Avant-propos	iii
Contexte et remerciements	iv
Liste des abréviations et acronymes	viii
Résumé	1
Première partie : Aperçu des méthodes d'évaluation des risques	
I. Introduction, contexte et portée.....	3
II. Glossaire de la terminologie applicable.....	3
III. Aperçu du processus de gestion des risques	6
IV. Introduction générale aux méthodes d'évaluation des risques	8
A. Identification des risques	10
B. Analyse des risques	12
C. Appréciation des risques	25
V. Avantages et inconvénients des évaluations des risques	28
A. Avantages des évaluations des risques et de l'application des méthodes d'évaluation des risques.....	28
B. Inconvénients des évaluations des risques et de l'application des méthodes d'évaluation des risques.....	30
VI. Conclusions	32
Seconde partie : Études de cas et outils logiciels	
I. Introduction et sélection des études de cas.....	34
II. Informations clés demandées.....	34
III. Présentation des études de cas	35
A. Gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié.....	35
B. Réfrigération à l'ammoniac	41
C. Terminaux pétroliers	48
D. Stockage du nitrate d'ammonium.....	54
E. Chlore.....	57
IV. Principales conclusions.....	64
Annexe – Outils logiciels	
I. Logiciels d'analyse des dangers.....	67
II. Logiciels d'analyse par arbre d'événements ou par arbre de défaillances	67
III. Logiciels d'analyse quantitative des risques	69
IV. Logiciels d'analyse des conséquences	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Exemple de matrice d'incompatibilité chimique	11
Tableau 2.	Analyse « What if » ou analyse « What if »/liste de contrôle : résultats obtenus dans le cas d'une usine de polyuréthane haute pression et basse densité	14
Tableau 3.	Analyse HazOp : mots guides pour l'établissement de scénarios	15
Tableau 4.	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets : exemple de résultat pour une installation de traitement.....	17
Tableau 5.	Comparaison des outils et des méthodes d'analyse des risques	23
Tableau 6.	Exemple de matrice de risque	25
Tableau 7.	Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Finlande).....	35
Tableau 8.	Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (France).....	36
Tableau 9.	Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Suède).....	37
Tableau 10.	Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Suisse) ...	39
Tableau 11.	Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Estonie).....	42
Tableau 12.	Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Finlande).....	43
Tableau 13.	Résumé de l'étude de cas sur la réfrigération à l'ammoniac (Hongrie).....	44
Tableau 14.	Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière).....	47
Tableau 15.	Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Allemagne)	49
Tableau 16.	Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Norvège).....	49
Tableau 17.	Résumé de l'étude de cas sur les terminaux pétroliers (Serbie, contexte transfrontière)	51
Tableau 18.	Niveaux quantitatifs de gravité utilisés dans la matrice de risque	52
Tableau 19.	Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Slovénie).....	52
Tableau 20.	Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Estonie)	54
Tableau 21.	Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Lettonie)	55
Tableau 22.	Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Pays-Bas)	56
Tableau 23.	Résumé de l'étude de cas concernant le chlore (France)	57
Tableau 24.	Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (France).....	58
Tableau 25.	Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Hongrie)	59
Tableau 26.	Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière)	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Aperçu du processus de gestion des risques	7
Figure 2.	Processus d'évaluation des risques	9
Figure 3.	Analyse HazOp : procédure	16
Figure 4.	Couches de protection indépendantes contre un éventuel accident	18
Figure 5.	Exemple d'arbre de défaillances pour un système de protection contre l'incendie.....	20
Figure 6.	Arbre d'événements pour l'événement initiateur « interruption de l'alimentation du réacteur d'oxydation en eau de refroidissement »	21
Figure 7.	Diagramme « nœud papillon » établi dans le cadre du projet ARAMIS	22
Figure 8.	Comparaison des critères d'acceptabilité du risque individuel par pays (probabilité d'exposition d'une personne à un danger mortel en un an).....	26
Figure 9.	Critères d'appréciation de la Suisse basés sur les courbes fréquence-gravité (courbes F/N).....	27
Figure 10.	Zonage et utilisations autorisées	29
Figure 11.	Représentation cartographique des risques individuels dans le cas d'une installation de gaz de pétrole liquéfié en Suède	38
Figure 12.	Réservoir de gaz de pétrole liquéfié (Suisse).....	40
Figure 13.	Contours de risque – gaz de pétrole liquéfié (Suisse).....	40
Figure 14.	Présentation des risques liés au gaz de pétrole liquéfié (Suisse).....	41
Figure 15.	Critères d'acceptabilité des risques liés aux gaz de pétrole liquéfiés (Suisse)	41
Figure 16.	Probabilité de décès en fonction de la distance – rejet d'ammoniac (Hongrie).....	45
Figure 17.	Contours de probabilité de décès due à la toxicité de l'ammoniac – taux de létalité de 1 % et 10 % (Hongrie)	45
Figure 18.	Contours de risque individuel – rejet d'ammoniac (Hongrie).....	46
Figure 19.	Courbe F/N de risque sociétal – rejet d'ammoniac (Hongrie)	46
Figure 20.	Critères d'acceptabilité des risques liés à l'ammoniac (Hongrie).....	46
Figure 21.	Représentation des risques liés à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière).....	48
Figure 22.	Critères d'acceptabilité des risques liés à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière)	48
Figure 23.	Contours de risque individuel – terminal pétrolier (Norvège)	50
Figure 24.	Probabilité de décès en fonction de la distance – rejet de chlore (Hongrie).....	60
Figure 25.	Contours de probabilité de décès due à la toxicité du chlore – taux de létalité de 1 %, 5 %, 50 % et 100 % (Hongrie)	60
Figure 26.	Contours de risque individuel – rejet de chlore (Hongrie).....	61
Figure 27.	Courbe F/N de risque sociétal – rejet de chlore (Hongrie).....	61
Figure 28.	Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Hongrie)	61
Figure 29.	Présentation des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière).....	63
Figure 30.	Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière).....	63

Liste des abréviations et acronymes

AEGL	Guide de seuils d'exposition aiguë
ALARP/ALARA	Principe d'optimisation ALARP/ALARA (aussi bas que raisonnablement possible)
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres (Localisation en surface des atmosphères dangereuses)
AMDE	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets
AMDEC	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
BLEVE	Vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition
CEE	Commission économique pour l'Europe
CFD	Mécanique des fluides numérique
DIPPR	Design Institute for Physical Properties
EPA	Agence de protection de l'environnement
EPRI	Electric Power Research Institute
GNL	Gaz naturel liquéfié
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HazId	Identification des dangers
HazOp	Analyse des dangers et de l'exploitabilité
LOPA	Analyse des couches de protection
NaTech	Accident technologique provoqué par un aléa naturel
RIVM	National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands (Institut néerlandais de protection de la santé publique et de l'environnement)
RMP	Programme de gestion des risques
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SIS	Système instrumenté de sécurité
TNT	Trinitrotoluène

Résumé

Les accidents industriels peuvent avoir de graves conséquences pour les populations, l'environnement et l'économie. Décès, épidémies, dommages corporels, pollution de l'environnement, appauvrissement de la biodiversité, conflits, instabilité politique et pertes financières sont parmi les conséquences observées par le passé. Les États et les organisations internationales ont élaboré des instruments juridiques et des moyens d'action destinés à renforcer la prévention des accidents industriels et les mesures à prendre pour s'y préparer et pour y faire face. La Convention de la CEE sur les effets transfrontières des accidents industriels est un instrument juridique international qui engage ses Parties à prendre des mesures de sécurité à cet effet. Les Parties sont convenues que l'évaluation des risques constituait un élément clef de la Convention, comme en témoignent son article 6 et son annexe V. La présente publication vise à enrichir les connaissances sur l'évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels.

On entend ici par « évaluation des risques » le processus global d'identification, d'analyse et d'appréciation des risques. Il existe de nombreuses méthodes permettant de mesurer et de comprendre les risques que comportent les activités dangereuses. La première partie de la présente publication donne un aperçu général, quoique non exhaustif, de ces méthodes et revient notamment sur celles utilisées dans la région de la CEE. Cet aperçu peut se révéler utile pour éclairer les décideurs dans la sélection et l'élaboration de méthodes d'évaluation des risques adaptées aux différents types d'installations et aux particularités de chaque situation. En outre, avec une bonne compréhension des méthodes d'évaluation des risques, les autorités peuvent mieux tenir compte des résultats de ces évaluations lorsqu'elles prennent d'importantes décisions, notamment concernant le choix des sites des activités dangereuses, les exigences en matière de mesures de sécurité, la planification des interventions d'urgence et les informations devant être communiquées aux populations susceptibles d'être touchées par un accident.

La seconde partie de la présente publication revêt une dimension plus pratique : elle réunit 18 études de cas dans lesquelles des méthodes d'évaluation des risques ont été appliquées à des installations industrielles. Ces études de cas ont été soumises par les Parties à la Convention suivantes : Allemagne, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Lettonie, Norvège, Pays-Bas, Serbie, Slovénie, Suède et Suisse. Ces études de cas couvrent cinq types d'installations : les réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL)/gaz de pétrole liquéfié (GPL), les installations de réfrigération à l'ammoniac, les terminaux pétroliers (installations de chargement/déchargement/stockage d'hydrocarbures), les installations de stockage de nitrate d'ammonium et les installations de production de chlore. Cinq des études illustrent l'évaluation des risques transfrontières posés par des installations industrielles, de nombreux pays ayant indiqué qu'ils rencontraient des difficultés à mener ce type d'évaluation. On trouvera en outre en annexe une liste des outils logiciels destinés à faciliter l'évaluation des risques.

En conclusion, l'évaluation des risques peut contribuer à prévenir les accidents industriels et, lorsqu'il s'en produit, à atténuer leurs effets. Il est essentiel de comprendre les risques que présentent toutes les installations industrielles, y compris les risques transfrontières, si l'on veut mettre au point des mesures de prévention, de préparation et d'intervention. Le risque zéro n'existe pas, même dans l'installation industrielle la plus sûre qui soit. La présente publication répond au besoin d'informations et d'échange de connaissances sur l'évaluation des risques. Elle constitue une ressource pour les autorités nationales, les décideurs, les exploitants et quiconque souhaite approfondir sa connaissance de l'évaluation des risques que présentent les installations industrielles en vue de mieux prévenir les accidents.

Première partie

Aperçu des méthodes d'évaluation des risques



I. Introduction, contexte et portée

La Convention de 1992 de la Commission économique pour l'Europe (CEE) sur les effets transfrontières des accidents industriels, entrée en vigueur en 2000, vise à aider ses Parties à prévenir les accidents industriels, en particulier les accidents susceptibles d'avoir des effets transfrontières, à s'y préparer et à intervenir le cas échéant. Elle encourage la coopération transfrontière en matière de prévention des accidents industriels, de préparation à de tels accidents et d'intervention en cas d'accident entre ses Parties et au-delà, notamment dans les pays d'Europe orientale, d'Europe du Sud-Est, du Caucase et d'Asie centrale bénéficiaires du programme d'assistance et de coopération de la Convention. Le plan de travail guide les Parties à la Convention, les États non Parties de la région de la CEE, le Bureau, le Groupe de travail de l'application, le Groupe mixte d'experts de l'eau et des accidents industriels (Groupe mixte d'experts) et le secrétariat dans leurs activités. Celles-ci sont principalement axées sur la région de la CEE, mais peuvent également être bénéfiques à des États Membres de l'Organisation des Nations Unies extérieurs à la région, selon ce que prévoient les stratégies de communication, de sensibilisation et de mobilisation.

L'évaluation des risques, qui est une composante à part entière de la prévention des accidents, est prévue dans les dispositions de la Convention (par exemple, à l'article 6 et à l'annexe V). Un séminaire de la CEE sur les méthodes d'évaluation des risques a été organisé le 4 décembre 2018 à Genève pour aider les pays de la CEE à appliquer les dispositions pertinentes de la Convention en facilitant l'échange d'informations et le partage d'expériences sur l'application des méthodes d'évaluation des risques. Les principales conclusions du séminaire mettent notamment en évidence des difficultés en matière d'évaluation des risques transfrontières et la nécessité d'échanger davantage d'informations sur les méthodes d'évaluation des risques utilisées dans la région de la CEE, notamment sur les outils logiciels disponibles. L'élaboration du présent rapport a donc été considérée comme une priorité parmi les recommandations issues du séminaire.

Le présent rapport offre un aperçu général des méthodes d'évaluation des risques liés aux activités dangereuses. Il ne vise pas à être exhaustif, mais plutôt à donner une vue d'ensemble des méthodes d'évaluation utilisées dans la région de la CEE.

Ce rapport doit être lu en parallèle avec le rapport intitulé « Évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels : Études de cas sélectionnées et outils logiciels disponibles » (ci-après dénommé « seconde partie »). Dans la seconde partie sont présentées des études de cas relatives à l'application de méthodes d'évaluation des risques à des installations chimiques de la région de la CEE, y compris dans un contexte transfrontière. L'annexe de la seconde partie contient une liste d'outils logiciels utiles à l'évaluation des risques auxquels sont exposées les installations chimiques.

II. Glossaire de la terminologie applicable

Dans cette section sont définis les termes clés couramment utilisés dans le domaine de la gestion des risques, classés en fonction des différentes composantes de celle-ci (voir fig.1).

La terminologie générale est la suivante :

- a) « Danger » – Propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine ou l'environnement¹. Les substances dangereuses sont visées à l'annexe I de la Convention ;
- b) « Activité dangereuse » – Toute activité dans laquelle une ou plusieurs substances dangereuses sont ou peuvent être présentes dans des quantités égales ou supérieures aux quantités limites énumérées à l'annexe I de la Convention, et qui est susceptible d'avoir des effets transfrontières ;

¹ Directive Seveso III de l'Union européenne (art. 3, par. 14) (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0018>).

- c) « Risque » – Probabilité qu'un effet particulier se produise au cours d'une période donnée ou dans des circonstances déterminées² ;
- d) « Risque individuel » – Risque auquel est exposée une personne à proximité d'un danger, y compris la nature du dommage susceptible d'être subi par la personne, la probabilité que le dommage se produise et la période au cours de laquelle le dommage pourrait se produire³ ;
- e) « Risque sociétal » – Mesure du risque pour un groupe de personnes, souvent exprimée comme la distribution de fréquences d'événements faisant de multiples victimes⁴ ;
- f) « Évaluation des risques » – Processus global d'identification, d'analyse et d'appréciation des risques⁵ ;
- g) « Gestion des risques » – activités coordonnées visant à diriger et à piloter l'approche d'une organisation face aux risques⁶ ;
- h) « Partie prenante » – Personne ou organisation pouvant influencer sur une décision ou une activité ou être touchée ou se considérer comme touchée par l'une ou l'autre⁷ ;
- i) « Effets transfrontières » – Effets graves s'étendant au-delà des frontières nationales et concernant généralement la santé humaine et l'environnement.

La terminologie relative à l'identification des risques et des dangers est la suivante :

- a) « Analyse des dangers » – Identification des dangers individuels que présente un système, détermination des mécanismes par lesquels ces dangers pourraient se traduire par des événements indésirables, et évaluation des conséquences de tels événements sur la santé (y compris la santé publique), l'environnement et les biens⁸ ;
- b) « Identification des dangers » – Identification des sources de risque susceptibles de provoquer des effets/événements néfastes pour l'homme ou l'environnement, et description qualitative de la nature de ces effets/événements⁹ ;
- c) « Analyse des dangers et de l'exploitabilité (HazOp) » – voir la sous-section B.3.2 ;
- d) « Cause/événement déclencheur » – Erreur opérationnelle, défaillance mécanique ou événement externe constituant le premier événement d'une série d'incidents et marquant le passage d'une situation normale à une situation anormale¹⁰ ;
- e) « Événement de défaillance » – Moment dans une situation anormale où se produit un événement physique irréversible susceptible d'entraîner des pertes et des dommages¹¹ ;
- f) « Défaillance du confinement » – Événement au cours duquel des substances dangereuses sont libérées, soit soudainement soit de façon continue, notamment en raison d'une fuite ou d'une rupture de systèmes de tuyauterie ou de réservoirs atmosphériques ou pressurisés ;
- g) « Identification des risques » – Processus de détection, de recensement et de description des risques¹² ;
- h) « Méthode "What if" » – voir la sous-section B.3.1.

² Centre for Chemical Process Safety (CCPS), *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria* (New York, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 2009).

³ Ibid.

⁴ Ibid.

⁵ Organisation internationale de normalisation (ISO), Guide ISO 73:2009 – Management du risque – Vocabulaire (2009).

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.

⁸ CCPS, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures : Third Edition* (New York, AIChE, 2008).

⁹ Commission européenne, « First Report on the Harmonization of Risk Assessment Procedures. Part 2: Appendices », Direction générale de la santé et des consommateurs. 26 et 27 octobre 2000.

¹⁰ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

¹¹ Ibid.

¹² ISO, Guide ISO 73:2009.

La terminologie relative à l'identification des risques et des dangers est la suivante :

- a) « Analyse des risques » – Processus visant à comprendre la nature des risques et à en déterminer le niveau¹³ ;
- b) « Catégories d'analyse des risques », comme suit :
 - i. « Analyse qualitative des risques » – Repose principalement sur la description et la comparaison des risques sur la base de données d'expérience et des règles de bonne pratique technique, et comporte peu de données quantitatives sur les dangers, les conséquences, la probabilité d'occurrence ou le niveau de risque¹⁴ ;
 - ii. « Analyse semi-quantitative des risques » – Comprend certains éléments relatifs à la quantification des conséquences, à la probabilité d'occurrence et/ou du niveau de risque¹⁵ ;
 - iii. « Analyse quantitative des risques » – Établissement systématique, à partir d'une évaluation technique et de méthodes mathématiques, d'estimations chiffrées de la fréquence et de la gravité possibles des incidents pouvant survenir dans une installation ou au cours d'une opération¹⁶ ;
- c) « Modèles de mécanique des fluides numérique » – Type de modèles capables de simuler des distributions tridimensionnelles à très haute résolution, en fonction de laps de temps, de flux d'air et de liquides et de concentrations de matières. Ces modèles servent généralement à déterminer les équations de base du mouvement et de la conservation à l'aide de grilles et d'étapes temporelles très réduites, et sont très gourmands en puissance de calcul¹⁷ ;
- d) « Évaluation/analyse des conséquences » – Processus de détermination et de quantification des effets néfastes causés par des expositions à un facteur de risque, indépendamment de la fréquence ou de la probabilité d'occurrence ;
- e) « Effets dominos » – Déclenchement d'événements secondaires, tels que des rejets toxiques, à la suite d'un événement initial, tel qu'une explosion, entraînant une aggravation des conséquences ou une augmentation de l'étendue de la zone touchée. Généralement pris en compte uniquement en cas de forte aggravation des conséquences de l'incident initial¹⁸ ;
- f) « Arbre d'événements » – Modèle logique qui représente graphiquement les combinaisons d'événements et de circonstances dans une série d'incidents¹⁹ ;
- g) « Analyse des modes de défaillance, de leurs effets (et de leur criticité) » (Failure modes, effects (and criticality) analysis (AMDE/AMDEC) » – voir la sous-section 2.3.3 ;
- h) « Arbre de défaillances » – Modèle logique représentant graphiquement les combinaisons de défaillances pouvant conduire à une défaillance principale particulière ou à un incident notable (événement principal)²⁰ ;
- i) « Fréquence » – Nombre d'événements ou de conséquences par unité de temps définie²¹ ;
- j) « Analyse de fréquence » – Processus de détermination de la fréquence d'un événement indésirable ;
- k) « Analyse des couches de protection (LOPA) » – voir la sous-section B.3.5 ;
- l) « Probabilité » – Mesure de la probabilité qu'une situation se produise, exprimée par un nombre compris entre 0 et 1, où 0 signifie que la situation est impossible et 1 signifie que la situation va se produire sans doute possible²² ;

¹³ Ibid.

¹⁴ CPPS, « CCPS Process Safety Glossary » (www.aiche.org/ccps/resources/glossary?page=1).

¹⁵ Ibid.

¹⁶ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

¹⁷ CPPS, « CCPS Process Safety Glossary ».

¹⁸ Ibid.

¹⁹ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

²⁰ Ibid.

²¹ ISO, Guide ISO 73:2009.

²² Ibid.

- m) « Modèle de rejet » – Modèle de représentation du transport de masse et/ou d'énergie associé à un rejet de matières et/ou d'énergie hors enceinte de confinement et de l'environnement dans lequel ce rejet a lieu ;
- n) « Systèmes de sécurité » – Équipements et/ou procédures destinés à freiner ou à enrayer une série d'incidents, limitant ainsi la gravité de l'accident et ses conséquences²³ ;
- o) « Scénario » – Description détaillée d'un événement non prévu ou d'une série d'incidents entraînant une défaillance, ainsi que de ses conséquences, y compris la bonne marche ou le dysfonctionnement des dispositifs de protection mis en place pour contrer la séquence d'incidents²⁴.

La terminologie relative à l'appréciation des risques est la suivante :

- a) « Appréciation des risques » – Processus consistant à comparer les résultats de l'analyse des risques avec les critères de risque afin de déterminer si les risques et/ou leur ampleur sont acceptables ou tolérables²⁵ ;
- b) « Critères de risque » – Critères de base à l'aune desquels l'importance d'un risque est évaluée²⁶. Les critères de risque sont fonction des objectifs opérationnels et du contexte externe et interne. Ils peuvent être dérivés de normes, de lois, de politiques ou d'autres prescriptions :
 - i. « Critères de risque sociétal » – Critères de risque appliqués à un groupe de personnes et aux personnes pouvant ne pas se trouver à proximité directe d'un danger ;
 - ii. « Critères de risque individuel » – Critères de risque appliqués aux personnes se trouvant à proximité d'un danger ;
 - iii. « Critères coûts-avantages » – Critères de risque élaborés en vue de définir un niveau à partir duquel le coût de la mise en œuvre de mesures supplémentaires de réduction des risques dépasse largement les avantages qui en sont tirés.

III. Aperçu du processus de gestion des risques

Les installations industrielles peuvent comporter des risques pour leur personnel, les biens, la population et l'environnement. Ces risques sont souvent liés à la nature des opérations menées, aux dangers associés aux matières stockées, aux caractéristiques des procédés, voire à l'inadéquation des systèmes de gestion. Pour y faire face, on applique généralement une méthode systématique visant à permettre aux parties prenantes d'identifier, d'évaluer et de maîtriser les risques. Dans la section 3 ci-dessous sont passés en revue certains principes de la gestion des risques, l'accent étant mis sur la composante d'évaluation des risques.

Le processus plus large de gestion des risques constitue un cadre et une méthode structurée grâce auxquels les opérateurs comprennent les risques liés aux activités industrielles dangereuses et sont à même de garantir des niveaux de risque acceptables en mettant en place des mesures de prévention et/ou d'atténuation adéquates. Dans un premier temps, la portée du processus de gestion des risques doit être définie, y compris le but et les objectifs de l'étude. Les conditions de base, les limites, les intrants et les extrants du processus doivent être clairement décrits, y compris les éléments suivants : conception des installations ou des procédés, risques naturels, actes intentionnels, erreurs humaines, défaillances mécaniques, risques hors site, incidences environnementales, effets domino et efficacité des interventions d'urgence. La gestion des risques comporte trois composantes séquentielles assorties de boucles de rétroaction et d'une communication continue avec les parties prenantes (voir fig. 1) :

- a) L'évaluation des risques, qui comprend elle-même trois étapes :

²³ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

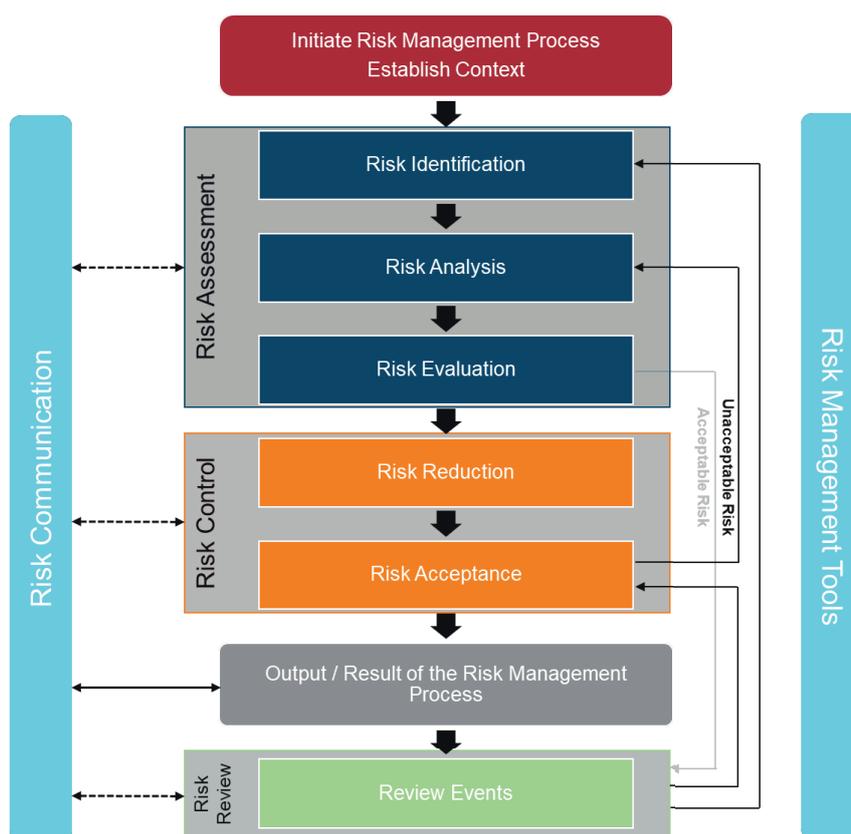
²⁴ CPPS, *Guidelines for Investigating Process Safety Incidents: Third Edition* (New York, AIChE, 2019).

²⁵ ISO, Guide ISO 73:2009.

²⁶ Ibid.

- i. L'identification des risques, qui vise à identifier les dangers et à décrire les risques y afférents ;
 - ii. L'analyse des risques, qui vise à mesurer le niveau de gravité des événements susceptibles de se produire et la probabilité qu'ils se produisent ;
 - iii. L'appréciation des risques, qui vise à déterminer si les risques sont acceptables pour les parties prenantes en fonction d'un niveau prédéterminé de tolérance au risque ;
- b) Le contrôle des risques, qui désigne les mesures de prévention et d'atténuation des risques prises à différents niveaux (par exemple, les contrôles techniques d'un procédé ou la mise en œuvre d'un programme de gestion de la sécurité des procédés) afin de limiter la probabilité de défaillances et/ou la gravité de leurs conséquences. Les mesures de réduction des risques sont ensuite intégrées à l'étape d'évaluation des risques, et les scénarios sont réévalués. Le processus se poursuit une fois les risques jugés acceptables ;
- c) L'examen des risques, qui vise à améliorer sans cesse le processus grâce à la surveillance et à l'audit des risques. Les enquêtes après incident et les enseignements tirés de l'expérience, les indicateurs avancés et retardés, l'amélioration des programmes de formation du personnel et les audits des programmes peuvent contribuer à déterminer les évolutions nécessaires en matière de réduction ou d'acceptation des risques.

Figure 1.
Aperçu du processus de gestion des risques



Source : Auteur du présent rapport.

Note : La définition des termes utilisés dans la figure 1 diffère selon les organisations. De ce fait, il peut y avoir des écarts entre les connaissances du lecteur et l'usage qui est fait des termes dans le présent rapport²⁷ (voir fig. 1 et sect. B pour plus de précisions).

²⁷ Ibid. Commission européenne, « Premier rapport » ; Frans Møller Christensen *et al.*, « Risk terminology - a platform for common understanding and better communication », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 103, n° 3 (2003), p. 181 à 203.

Le présent document porte essentiellement sur la phase d'évaluation des risques et ses trois étapes que sont l'identification, l'analyse et l'appréciation. Il ne couvre pas les autres étapes/éléments présentés à la figure 1.

En outre, le processus d'évaluation des risques s'appuie sur des normes de conception de base qui varient selon les pays. Des normes minimales de sécurité doivent être respectées avant qu'une méthode d'évaluation des risques soit adoptée, mais le niveau de sécurité que les autorités atteindront en se conformant aux codes et aux normes variera également d'un pays à l'autre. Il est donc essentiel de bien comprendre le contexte de l'évaluation des risques pour pouvoir établir des comparaisons entre les différentes parties prenantes dans un contexte transfrontière. Plusieurs parties prenantes peuvent avoir des avis très divergents quant au « risque acceptable ». Les critères d'appréciation harmonisés doivent : être un objectif à long terme de la coopération transfrontière ; être homogènes entre les différents types de parties prenantes ; être applicables à toutes les installations chimiques.

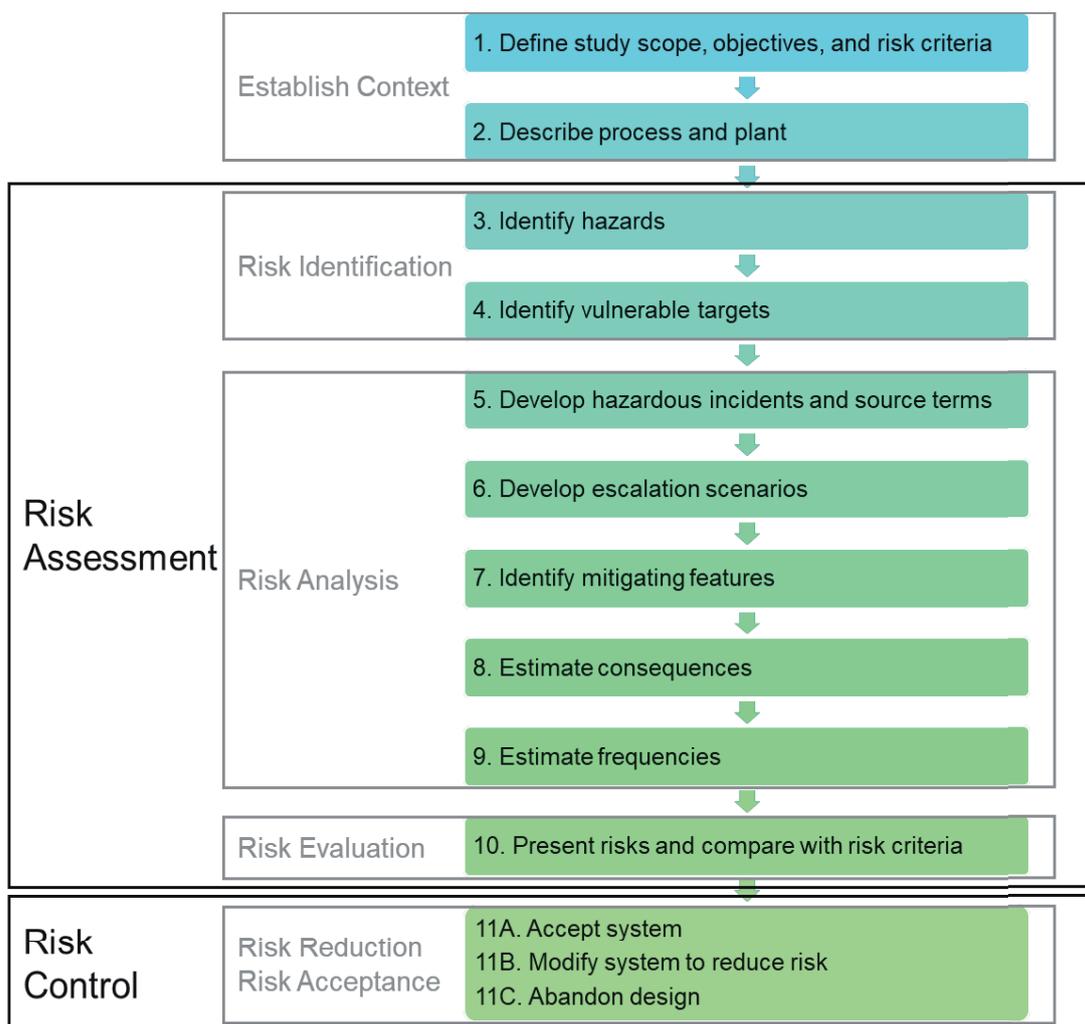
IV. Introduction générale aux méthodes d'évaluation des risques

Le présent rapport se concentre sur la première composante de la gestion des risques : l'évaluation des risques. Au sens large, l'évaluation des risques désigne le contrôle des procédés dangereux. Le présent document se limite au contrôle des conséquences graves des rejets accidentels de substances dangereuses (définies à l'annexe I de la Convention) de manière générale et, si possible, dans un contexte transfrontière également. La finalité de l'évaluation des risques est de mesurer les dangers et de parvenir à les éliminer ou à les limiter grâce à des mesures de contrôle (prévention et/ou atténuation). La prévention des dangers, par exemple l'élimination des substances ou des procédés dangereux ou leur substitution, est généralement privilégiée. En cas d'élimination d'une substance dangereuse, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la perte de confinement de cette substance dans l'évaluation des risques. Si elles sont efficaces, les mesures d'élimination ou de substitution sont généralement difficiles à mettre en œuvre dans le cas de procédés ou d'installations existants²⁸.

La figure 2 décrit en détail le processus d'évaluation des risques, y compris les étapes préliminaires (« Établissement du contexte ») et ultérieures (« Contrôle des risques »).

²⁸ Sources multiples, dont le National Institute for Occupational Safety and Health des États-Unis (www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html).

Figure 2.
Processus d'évaluation des risques



Source : Adapté de Sam Mannan (dir. publ.), *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (4^e Édition, Elsevier 2012), p. 291.

Les évaluations des risques doivent commencer par les étapes suivantes afin d'établir le contexte : définition de l'objet et de la portée de l'évaluation ; consultation des parties prenantes ; définition des objectifs ; prise en compte des facteurs humains, organisationnels et sociaux ; examen des critères de risque en vue de la prise de décisions²⁹.

Trois composantes sont examinées en détail dans cette section : l'identification des risques, l'analyse des risques et l'appréciation des risques. Cette structuration reprend celle de la norme 31010 de la Commission électrotechnique internationale³⁰. Dans la présente section sont détaillées les méthodes existantes d'analyse et d'appréciation des risques telles que décrites dans les annexes IV à VI de la Convention, ainsi que les mesures prises pour renforcer la gouvernance des risques, qui est l'un des objectifs de la stratégie à long terme pour la Convention jusqu'à 2030 (ECE/CP.TEIA/38/Add.1).

²⁹ Commission électrotechnique internationale (CEI)/ISO, IEC 31010:2019 – Management du risque – Techniques d'appréciation du risque (2019).

³⁰ Ibid.

A. Identification des risques

Une fois que les parties prenantes ont lancé le processus de gestion des risques et établi le contexte, la première étape de l'évaluation des risques consiste à identifier de manière claire et exhaustive les dangers et les récepteurs de dommages potentiels se trouvant dans l'installation en question ou la concernant. Il est important que les parties prenantes identifient les risques, indépendamment du fait qu'ils contrôlent ou non la source de ces risques³¹. Dans la figure 2, l'étape d'identification des risques (points 3 et 4) constitue la base de l'évaluation des risques.

1. Compréhension des dangers chimiques et physiques

L'identification des dangers correspond au point 3 de la figure 2. La première étape de l'identification des dangers consiste à déterminer et à documenter les caractéristiques et le volume des substances dangereuses utilisées dans une installation, par exemple les matières premières, les produits intermédiaires et les produits finis. Les caractéristiques à prendre en compte incluent la nature du danger (santé, environnement physique) et d'autres informations pertinentes (densité de la vapeur, point d'ébullition, inflammabilité, corrosivité, toxicité, réactivité, etc.). Les fiches de données de sécurité contiennent généralement ces informations, mais ne sont pas toujours assez détaillées, notamment pour ce qui est de l'évaluation des problèmes de réactivité chimique (les fiches peuvent ne pas renseigner certaines combinaisons de substances chimiques). Les autres ressources utiles comprennent les bases de données gouvernementales ou publiques, la littérature existante en la matière ou les logiciels ou bases de données disponibles dans le commerce. La base de données du Design Institute for Physical Properties est par exemple un outil de référence complet et largement utilisé³². Les matrices d'interaction et les listes de contrôle sont des exemples d'outils courants d'identification des dangers.

1.1. Matrice d'interaction

La matrice d'interaction est un outil simple permettant d'identifier les risques liés aux procédés grâce à l'analyse des incompatibilités dans l'installation. Des éléments précis tels que les substances dangereuses, les conditions du procédé et les facteurs environnementaux sont indiqués sur deux axes³³. La matrice est ensuite complétée en définissant les conséquences des combinaisons d'éléments (par exemple, mélange d'un produit chimique A avec un produit chimique B ou exposition d'un produit chimique A à une température élevée).

³¹ ISO, ISO 31000:2018 – Management du risque – Lignes directrices (2018).

³² Gouvernement flamand (Belgique), *Risk Calculations Manual: Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis* – Version 2.0, 1^{er} avril 2019 (Bruxelles).

³³ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

Tableau 1.
Exemple de matrice d'incompatibilité chimique

	Acids (Inorganic)	Acids (Organic)	Acids (Oxidizing)	Alkali (Bases)	Oxidizers	Toxic (Inorganic)	Toxic (Organic)	Water Reactive	Organic Solvent
Acids (Inorganic)		X		X		X	X	X	X
Acids (Organic)	X		X	X	X	X	X	X	
Acids (Oxidizing)		X		X		X	X	X	X
Alkali (Bases)	X	X	X				X	X	X
Oxidizers		X					X	X	X
Toxic (Inorganic)	X	X	X				X	X	X
Toxic (Organic)	X	X	X	X	X	X			
Water Reactive	X	X	X	X	X	X			
Organic Solvent	X		X	X	X	X			

Source : Auteur du présent rapport.

Note : Le tableau 1 répertorie les incompatibilités entre classes chimiques. Appliquée à une installation ou à un procédé, la matrice pourrait être plus précise en indiquant les réactions attendues et les conséquences en cas d'incompatibilité (par exemple, une réaction exothermique entraînant la libération de gaz inflammables). Cette mesure qualitative simple est par nature limitée mais peut servir d'outil d'identification précoce des risques.

1.2. Liste de contrôle

La liste de contrôle est une autre méthode de base d'identification des dangers. Elle consiste en une série de points à vérifier concernant les dangers liés à l'installation ou au procédé. Pour être complète et efficace, la liste doit porter sur des points généralement propres à une installation ou à un procédé et constituer une base cohérente et complète aux fins de l'identification des dangers. Voici quelques exemples de points à vérifier : a) la matière est inflammable et le point d'éclair est inférieur à la température à laquelle le procédé se déroule ; b) il y a un risque d'inhalation toxique pour les occupants au-delà des limites du site en cas de rejet dans l'atmosphère ; c) il y a un risque de réactivité lié à l'introduction des composants dans le réacteur discontinu. Les listes de contrôle peuvent être des outils efficaces d'identification des dangers, cependant elles ne permettent pas toujours de prévoir l'ensemble des situations à risque et des perturbations susceptibles de constituer un danger. Les points de contrôle utilisés dans le cadre de cette méthode doivent pouvoir être adaptés à chaque situation et tenir compte des observations et des modifications nécessaires apportées par l'équipe d'examen afin de s'assurer que les particularités de chaque installation ont été dûment prises en compte.

2. Identifier les éléments vulnérables

Les éléments vulnérables visés dans les évaluations des risques des installations chimiques incluent généralement les employés, le public hors site et les récepteurs environnementaux (y compris les effets transfrontières potentiels).

3. Résultats de l'étape d'identification des risques

Les résultats de l'étape d'identification des risques servent de point de départ à l'étape suivante : l'analyse des risques. L'identification des risques met généralement en évidence les dangers chimiques et les dangers liés au procédé. Il est nécessaire d'obtenir les informations énumérées ci-dessous avant de passer à l'analyse des risques :

- Liste des quantités et des classes de danger des substances dangereuses ;
- Risques liés aux réactions chimiques en cas de mélange chimique ;
- Risques naturels auxquels est exposé le lieu ;

- d) Risques physiques auxquels est exposé le procédé ou l'installation (pression ou température élevée, par exemple) ;
- e) Connaissance générale des scénarios susceptibles d'entraîner une défaillance du confinement ;
- f) Liste ou carte des points de vulnérabilité.

B. Analyse des risques

Après avoir identifié les risques liés à un système ou à une installation, l'étape suivante consiste à définir les risques associés aux dangers recensés au moyen d'une analyse des risques. L'objectif est de déterminer la fréquence ou la probabilité d'un événement (tel qu'un incendie ou une explosion) et l'importance des conséquences ou la gravité de cet événement. Tout au long de l'étape d'analyse des risques, il faut tenir compte à la fois des mesures de prévention et d'atténuation. Dans cette section sont passés en revue divers outils et méthodes d'analyse des risques, qui varient quant à leur niveau de précision, leur objectif et les données requises³⁴.

1. Processus d'analyse des risques

Une analyse des risques s'appuie généralement sur des scénarios élaborés au stade de l'identification des risques. Ces scénarios portent sur des événements précis de défaillance du confinement et visent à identifier des enchaînements d'accidents depuis les causes principales (défaillance mécanique, défaillance humaine) jusqu'aux effets majeurs attendus (incendie, explosion, rejet de substances toxiques) et aux effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

Pour faciliter l'élaboration des scénarios, le Centre commun de recherche de la Commission européenne a conçu, en collaboration avec les acteurs du secteur, un manuel dans lequel sont décrits des scénarios types recommandés pour un grand nombre de substances courantes (liquides inflammables, gaz naturel liquéfié, ammoniac anhydre, etc.)³⁵.

Le nombre de scénarios et leur niveau de détail varient en fonction de la méthode d'analyse utilisée. Dans le cas de méthodes qualitatives et semi-quantitatives, les parties prenantes peuvent prévoir de nombreux scénarios susceptibles de provoquer des événements indésirables. Les méthodes quantitatives, quant à elles, ne peuvent tenir compte que d'un nombre limité de scénarios, lesquels doivent être suffisamment précis pour permettre une analyse plus approfondie (scénarios crédibles les plus défavorables, par exemple). Pour chaque scénario identifié, une analyse numérique doit être effectuée. Dans le cas où les résultats sont exprimés dans un ensemble commun d'unités (décès potentiels par an, blessures par an, quantité d'eau de surface ou d'eau souterraine polluée par an, etc.), il est possible de les additionner pour obtenir des valeurs globales relatives à une population de récepteurs dans plusieurs scénarios distincts.

Dans le cas d'analyses quantitatives des risques, le choix du scénario doit faire l'objet d'une réflexion plus poussée. Il faut définir un terme source afin d'élaborer le scénario de rejet en estimant les taux de rejet et la quantité totale rejetée³⁶. L'élaboration du terme source doit impérativement tenir compte de la phase de rejet, du type de rejet (rupture de canalisation, déversement accidentel, etc.) et de la durée de la fuite. Les termes sources courants à prendre en compte et les méthodes de calcul sont exposés dans des publications en la matière (par exemple, le Yellow Book³⁷ du Comité pour la prévention des

³⁴ Karmen Poljansek et al., *Recommendations for national risk assessment for disaster risk management in EU: approaches for identifying, analysing and evaluating risks – version 0* (Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2019).

³⁵ Michael Struckl, *Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks* (Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2017).

³⁶ CPPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis: Second Edition* (New York, AIChE, 1999) ; X. Seguí et al., « Methodology for the quantification of toxic dispersions originated in warehouse fires and Its application to the QRA in Catalonia (Spain) », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 32 (novembre 2014), p. 404 à 414.

³⁷ C. J. H. van den Bosch et R. A. P. M. Weterings, dir. publ., *CPR 14E – Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – « Yellow Book »* (La Haye, CPR, 1996).

catastrophes ou les lignes directrices pour l'analyse quantitative des risques liés aux procédés chimiques (*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*)³⁸.

2. Méthodes d'analyse des risques

De nombreuses méthodes d'analyse des risques sont utilisées aux différentes étapes du processus. Les outils d'identification des risques liés aux procédés, tels que les listes de contrôle « What if » et la méthode HazOp, visent généralement à déterminer tous les scénarios potentiels sur un site particulier. Une deuxième série d'outils d'analyse des risques est utilisée pour examiner les mesures de contrôle et les probabilités d'occurrence, comme la méthode LOPA et l'analyse par arbre de défaillance. Ces méthodes sont appliquées à certains scénarios afin de déterminer l'adéquation des mesures de contrôle et, dans le cas d'une analyse quantitative ou semi-quantitative, de déterminer la probabilité d'un accident.

Les méthodes d'analyse des risques peuvent être qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives, comme expliqué plus loin dans cette section. Les méthodes d'analyse des risques peuvent encore être subdivisées en fonction du type de résultat :

- a) Les méthodes déterministes s'appuient sur un scénario de danger précis en vue de déterminer les conséquences pour les personnes et l'environnement en fonction d'un ensemble de circonstances définies. Ces méthodes ne tiennent donc pas compte de la probabilité d'occurrence de tous les événements possibles, mais mettent plutôt l'accent sur un scénario particulier, tel que le scénario le plus défavorable ou l'événement le plus susceptible de se produire³⁹ ;
- b) Les méthodes probabilistes se fondent sur la probabilité qu'un scénario de défaillance particulier se réalise (généralement une défaillance technique) et sur les différentes conséquences possibles⁴⁰. Ces méthodes permettent donc de déterminer les probabilités de réalisation de nombreux scénarios aux conséquences néfastes.

La variété des méthodes d'analyse des risques disponibles offre une certaine flexibilité aux utilisateurs, leur permettant de tenir compte de la complexité de l'installation et de la disponibilité des informations relatives à celle-ci et au procédé. La présente section présente les méthodes d'analyse des risques couramment utilisées dans les industries de transformation. Cette liste n'est pas exhaustive, car il existe de nombreuses variations et approches hybrides⁴¹. Une analyse des risques typique peut combiner des méthodes qualitatives et quantitatives. Il est ainsi fréquent de commencer par une méthode qualitative pour identifier tous les scénarios possibles, puis d'utiliser des méthodes quantitatives pour examiner en détail des scénarios particuliers.

2.1. Méthodes qualitatives

Les méthodes d'analyse qualitative des risques sont généralement les moins complexes dans la mesure où elles ne requièrent pas de calculs, de modélisation informatique ou de bases de données concernant la fréquence des défaillances. Ces méthodes servent à acquérir des connaissances générales quant aux risques liés à un procédé ou à une installation particulière et à déterminer quels systèmes ou équipements pourraient nécessiter une analyse plus poussée au moyen d'une méthode plus détaillée. En raison de leur nature même, qui se fonde sur l'expertise des membres de l'équipe d'examen, les méthodes qualitatives peuvent être limitées pour ce qui est de décrire avec précision les risques.

2.2. Méthodes semi-quantitatives

Les méthodes d'analyse semi-quantitatives des risques visent à quantifier dans une certaine mesure les conséquences d'un événement, sa probabilité d'occurrence et/ou le niveau de risque. Elles sont généralement utilisées quand les parties prenantes demandent un niveau de détail plus poussé en matière de quantification dans le cadre de scénarios de défaillance et de leurs conséquences, mais n'ont pas nécessairement besoin d'une analyse des risques entièrement quantitative ou n'ont pas les

³⁸ CPPS, *Guidelines for Chemical*.

³⁹ Poljansek, *Recommendations*.

⁴⁰ J. Tixier et al., « Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, n° 4 (juillet 2002), p. 291 à 303.

⁴¹ Mannan, *Lees' Loss*.

moyens de l'effectuer. De telles méthodes peuvent suffire dans le cas d'installations pour lesquelles les dangers ne posent pas de risque significatif sur le site et/ou hors du site. Elles présentent les mêmes limites que les méthodes qualitatives, notamment le fait de s'appuyer sur le jugement d'experts, mais permettent de quantifier le risque en termes relatifs, ce qui se traduit par une meilleure appréciation des risques (étape suivante du processus d'évaluation des risques).

2.3. Méthodes quantitatives

Contrairement aux méthodes qualitatives, les méthodes d'analyse quantitative des risques incluent des estimations numériques de la gravité et de la probabilité ou de la fréquence d'un événement de perte de confinement. Ces méthodes nécessitent une élaboration et une exécution plus rigoureuses. Elles passent par un grand nombre d'étapes, notamment l'élaboration de scénarios et de termes sources, l'analyse des conséquences découlant des scénarios retenus, le calcul de la probabilité ou de la fréquence des défaillances conduisant aux scénarios retenus, et l'examen des effets des mesures de protection mises en place pour prévenir ou atténuer les conséquences des scénarios analysés.

3. Outils d'analyse des risques

Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'utiliser plusieurs outils d'analyse des risques pour couvrir toutes les étapes de l'analyse des risques indiquées dans la figure 2 (voir le tableau 5 pour un résumé). Plusieurs outils sont décrits en détail ci-dessous.

3.1. « What if » (« Que se passe-t-il si ? »)/liste de contrôle

La méthode « What if » consiste à utiliser une liste de questions préremplies, basées sur un scénario, en vue de l'identification initiale des dangers liés au procédé, afin de déterminer les dangers et les scénarios potentiels de défaillance du confinement. Une équipe d'examen passe en revue ces questions et apporte des réponses détaillées en vue de l'élaboration de recommandations visant à prévenir toute défaillance du confinement ou à atténuer les effets (voir le tableau 2 pour un exemple d'application de la méthode « What if »). De par sa procédure, la méthode « What if » est plus à même de mettre en évidence les dangers propres au procédé qu'une liste de contrôle basique. Son efficacité est toutefois limitée par l'expérience des membres de l'équipe d'examen. Pour pallier les insuffisances de cette méthode, on peut l'utiliser en combinaison avec une liste de contrôle de façon à réaliser une analyse plus approfondie et éclairée⁴².

Tableau 2.

Analyse « What if » ou analyse « What if »/liste de contrôle : résultats obtenus dans le cas d'une usine de polyuréthane haute pression et basse densité

What-If?	Consequence/Hazard	Recommendations
Coolant pump to reactor fails	Runaway condition in reactor with potential to cause explosion/fatality	Provide accurate temperature monitoring in reactor Employ backup pump/high temperature alarm Relieve reactor pressure through automatic control to stop reactions Provide automatic shut-off of ethylene flow
Runaway condition in reactor	Explosion; fire/fatality	Provide adequate temperature control on coolant line Use heat exchanger flow control to adjust inlet temperature Install rupture disk/relief valve to relieve pressure to stop reactions Emergency shut-down procedure
Ethylene leaks out of process lines	Fire; explosion	Provide adequate flammable gas monitoring devices

Source : Adapté de Sam Mannan (dir. publ.), *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (4^e édition, Elsevier 2012), p. 233.

⁴² CCPS, *Guidelines for Hazard*.

3.2. Analyse des dangers et de l'exploitabilité (HazOp)

Une analyse HazOp consiste à passer en revue de manière systématique les dangers liés à une installation. Elle est utilisée par l'industrie chimique dans le monde entier. Pour la réaliser, l'installation est subdivisée en systèmes et sous-systèmes contrôlables, appelés nœuds. Les écarts éventuels par rapport au fonctionnement normal de ces sous-systèmes sont étudiés par une équipe pluridisciplinaire. Les schémas de tuyauterie et d'instrumentation du processus sont examinés méthodiquement afin de déterminer les causes d'anomalie et les conséquences négatives de tous les écarts susceptibles de survenir⁴³. La méthode HazOp est présentée à la figure 3⁴⁴.

Un ensemble de mots guides et de paramètres sont utilisés conjointement pour déterminer des écarts hypothétiques par rapport à un fonctionnement normal (par exemple, absence de débit dans un procédé ou température élevée dans un réacteur). Des exemples de ces écarts figurent au tableau 3.

Tableau 3.
Analyse HazOp : mots guides pour l'établissement de scénarios

<i>Mot guide</i>	<i>Signification</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Écart</i>
Néant	Négation de l'intention	Débit Niveau	Pas de débit Niveau zéro
Moins de	Diminution quantitative	Débit Niveau Température Pression Concentration	Faible débit Niveau bas Température basse Pression faible Concentration faible
Plus de	Augmentation quantitative	Débit Niveau Température Pression Concentration	Débit élevé Niveau élevé Température élevée Pression élevée Concentration élevée
Inverse	Opposition logique	Débit Pression	Débit inverse Pression inverse
En partie	Diminution qualitative	Concentration Débit Niveau	Diminution de la concentration Diminution du débit Diminution du niveau
En plus de	Augmentation qualitative	Concentration d'impureté Température de la substance Niveau d'impureté Pression de la substance Débit d'impureté	Augmentation de la concentration Augmentation de la température Augmentation du niveau Augmentation de la pression Augmentation du débit

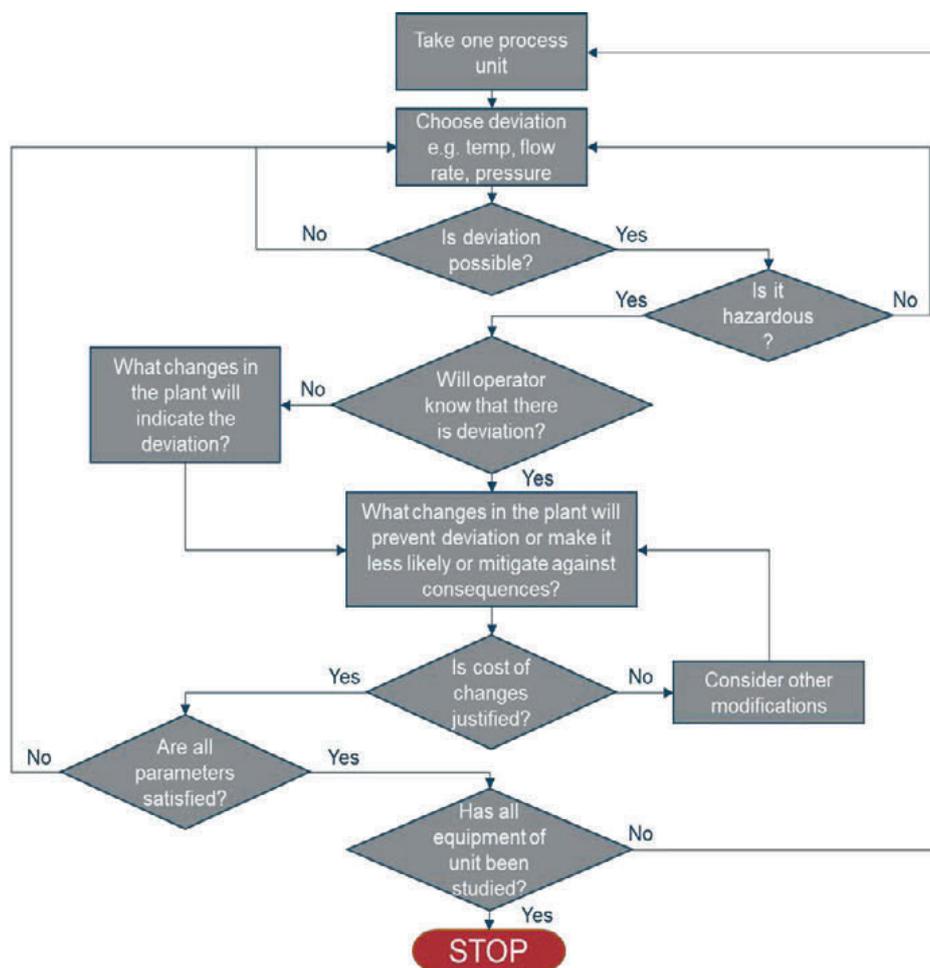
⁴³ P. K. Marhailas, D. Koulouriotis et V. Gemeni, « Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009 », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, n° 5 (septembre, 2011), p. 477 à 523.

⁴⁴ Faisal I. Khan et S. A. Abbasi, « OptHAZOP - an effective and optimum approach for HAZOP study », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 10, n° 3 (mai 1997), p. 191 à 204.

Mot guide	Signification	Paramètre	Écart
Autre que	Substitution complète	Concentration de la substance souhaitée	Concentration zéro
		Niveau de la substance souhaitée	Niveau zéro
		Débit de la substance souhaitée	Débit zéro

Source : Faisal I. Khan et S. A. Abbasi, « Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 11, n° 4 (juillet 1998), p. 266.

Figure 3.
Analyse HazOp : procédure



Source : Adapté de Faisal I. Khan et S. A. Abbasi, « OptHAZOP – an effective and optimum approach for HAZOP study », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 10, n° 3 (mai 1997) p. 192.

L'équipe HazOp utilise ce cadre méthodologique pour déterminer les mesures afin d'atténuer les conséquences et/ou la fréquence d'un écart. La méthode HazOp permet en outre d'évaluer simultanément les causes et les conséquences d'un écart et peut s'appliquer à tout système ou procédé⁴⁵. Les analyses HazOp sont généralement chronophages et nécessitent une équipe pluridisciplinaire.

⁴⁵ Mannan, Lees' Loss.

3.3. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une méthode inductive et ascendante consistant à recenser les modes de défaillance d'un équipement donné et les conséquences de la défaillance. Le mode de défaillance indique de quelle manière un élément d'un système tombe en panne (ouvert, fermé, etc.) et les conséquences de la défaillance sont déterminées en fonction de la réponse du système⁴⁶. Le tableau 4 est un exemple de feuille de travail AMDE.

Tableau 4.

Analyse des modes de défaillance et de leurs effets : exemple de résultat pour une installation de traitement

Component	Failure or Error Mode	Effects on Other System Components	Effects on Whole System	Failure Frequency	Detection Methods	Compensating Provisions and Remarks
Pressure Relief Valve	Jammed open	Increased operation of temperature sensing controller, and gas flow, due to hot water loss	Loss of hot water; greater cold water input, and greater gas consumption	Reasonably probable	Observe at pressure relief valve	Shut off water supply; reseal or replace relief valve.
	Jammed closed	None	None	Probable	Manual testing	Unless combined with other component failure, this failure has no consequence.
Temperature measuring and comparing device	Fails to react to temperature rise above preset level	Controller gas valve, burner continue to function 'on.' Pressure relief valve opens	Water temperature too high	Remote	Observe at output (faucet)	Pressure relief valve compensates. Open hot water faucet to relieve pressure. Shut off gas supply.

Source : Adapté de Sam Mannan (dir. publ.), *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (4^e édition, Elsevier 2012), p. 255 ; J. L. Recht, *Systems safety analysis: Failure mode and effect* (National Safety News February, 1966), p. 24 ; D. M. Himmelblau, *Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes* (Elsevier Amsterdam, 1978).

L'AMDE est un outil pouvant être très efficace grâce à son approche systématique et structurée. Cependant, les modes de défaillance des nouveaux systèmes pourraient ne pas être connus dans la pratique et la méthode pourrait ne pas mettre suffisamment en évidence les défaillances critiques. L'AMDE peut inclure une analyse de la criticité du mode de défaillance (AMDEC), qui permet de disposer d'une base davantage quantitative pour l'analyse des risques⁴⁷.

3.4. Méthode HazOp avec niveaux de risque

La méthode HazOp peut être élargie pour inclure une composante d'analyse des risques. Grâce à une matrice de risque, l'équipe peut démontrer que les recommandations élaborées permettent de réduire adéquatement les risques identifiés. La feuille de travail HazOp peut être enrichie en incluant, pour chaque scénario, les risques de base, les risques compte tenu des mesures de protection existantes et les risques après mise en place de mesures de protection supplémentaires.

Une matrice de risque assortie de niveaux de gravité et de fréquence pourrait servir à éclairer l'équipe HazOp dans le cadre de son analyse des risques (voir sect. 3.2). Même si les niveaux de risque sont déterminés de manière consensuelle, ce sont souvent les participants à l'analyse qui déterminent la gravité et la probabilité des conséquences à partir de leurs connaissances et de leur expérience. Une évaluation quantitative peut fournir des valeurs plus objectives et vérifiables.

⁴⁶ CCPS, *Guidelines for Hazard*. et J. F. W. Peeters, R.J. I. Basten et T. Tinga, « Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 172 (avril 2017).

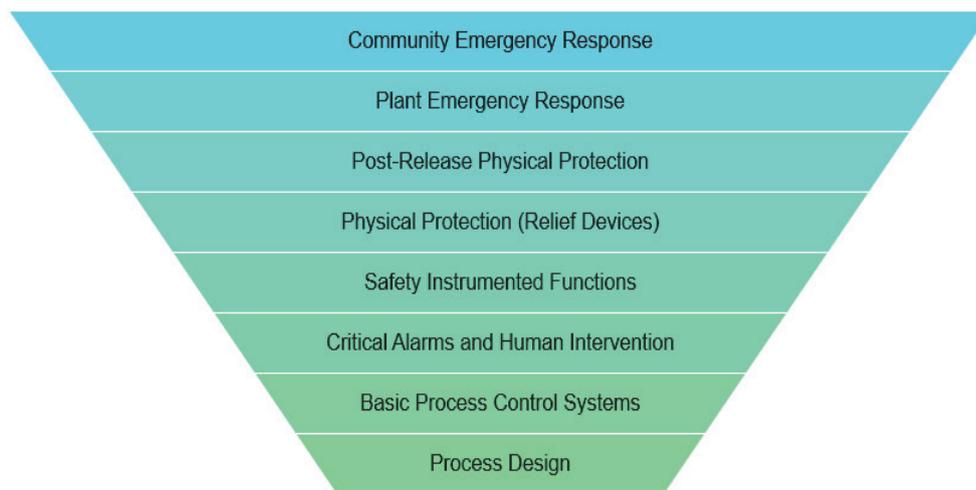
⁴⁷ Mannan, *Lees' Loss*.

3.5. Analyse des couches de protection

L'analyse des couches de protection (Layers of Protection Analysis (LOPA)) est une forme simplifiée d'analyse quantitative des risques. Elle se fonde sur des catégories d'ordre de grandeur pour établir la fréquence des événements initiateurs, la gravité des conséquences et la probabilité de défaillance des mesures de protection, et est donc considérée comme un outil d'analyse de risque semi-quantitative⁴⁸. Les mesures de protection analysées dans le cadre de la méthode LOPA sont considérées comme des couches de protection indépendantes. La figure 4 décrit les différentes couches de protection contre un danger.

Figure 4.

Couches de protection indépendantes contre un éventuel accident



Source : Center for Chemical Process Safety, *Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment* (American Institute of Chemical Engineers, 2001), p. 12.

La méthode LOPA est une méthode d'analyse des risques basée sur des scénarios. Ses étapes sont les suivantes :

- Repérer une conséquence, élaborer les scénarios possibles et choisir un scénario d'incident ;
- Déterminer la cause (événement initiateur) du scénario choisi et estimer sa fréquence d'occurrence ;
- Recenser les couches de protection indépendantes et estimer leurs fréquences de défaillance ;
- Calculer la fréquence globale du scénario en combinant la probabilité de l'événement initiateur et la probabilité de défaillance des couches de protection indépendantes ;
- Déterminer le niveau de risque du scénario en précisant l'ampleur de la conséquence et procéder à l'appréciation des risques.

La méthode LOPA demande moins de temps et d'efforts qu'une méthode entièrement quantitative, permet de définir plus facilement et de manière plus précise des paires cause-conséquence et peut contribuer à résoudre les conflits dans la prise de décisions en fournissant un cadre cohérent pour l'analyse des risques⁴⁹. La méthode LOPA en elle-même ne dresse pas systématiquement la liste des dangers et doit reposer sur un outil d'analyse des dangers tel qu'une analyse des dangers et de l'exploitabilité (HazOp) ou une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)⁵⁰.

⁴⁸ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

⁴⁹ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

⁵⁰ Ibid.

3.6. Analyse des conséquences (modèles de rejets et modèles d'effets)

Pour un terme source donné, on élabore des modèles de rejets afin de définir les caractéristiques du scénario en fonction du temps. Dans le cas des rejets liquides, les caractéristiques clés sont les débits, les vitesses d'évaporation et la taille du bassin de rétention ; pour les rejets de gaz ou de vapeurs, il est nécessaire de connaître le volume total attendu et les vitesses de rejet. Ces caractéristiques permettent de calculer les conséquences d'un événement (par exemple, la taille du nuage de vapeur est nécessaire pour estimer la taille de la boule de feu et l'amplitude de l'onde de pression résultant d'une explosion). Dans le cas des rejets de gaz ou de vapeurs, on utilise des modèles de dispersion pour déterminer la taille de la zone affectée et les concentrations moyennes attendues. Pour mettre au point les modèles, il faut connaître la vitesse de rejet du gaz, la hauteur de rejet, les conditions atmosphériques, la géométrie, la température, la pression et le diamètre du rejet. En outre, la densité du gaz ou de la vapeur ainsi que le type de rejet (instantané, continu ou variable dans le temps) sont pris en compte. Les outils logiciels utilisés pour estimer la taille des zones touchées par un terme source sont énumérés à l'annexe de la seconde partie.

Pour un scénario donné, il est possible d'étudier plus en détail les événements pertinents à l'aide de modèles d'effets dont l'objectif est de déterminer les effets de l'exposition à des substances toxiques, les effets thermiques d'un incendie ou les effets de l'onde de pression et de la boule de feu résultant d'une explosion. Dans le cas des explosions et des incendies, les effets pourraient être une surpression et un flux de rayonnement thermique entraînant des blessures ou des décès ; s'agissant des rejets toxiques, les effets pourraient inclure l'exposition à des concentrations dépassant les valeurs limites (par exemple, des concentrations immédiatement dangereuses pour la vie ou la santé). Ces modèles d'effets permettent de calculer les distances létales afin de déterminer le nombre potentiel de morts ou de blessés en fonction de la densité de population. L'analyse pourrait être étendue à l'étude des conséquences environnementales dans des secteurs plus éloignés de la source, comme la détermination des niveaux d'exposition aux produits chimiques toxiques pour les personnes dans les zones d'impact hors site (par exemple, les zones résidentielles ou commerciales), ou la quantification des rejets de produits chimiques dans les sols ou les cours d'eau.

3.7. Analyse par arbre de défaillances

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode déductive permettant de déterminer la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable, par exemple une défaillance du confinement (aussi appelée perte de confinement). L'événement principal, situé au sommet de l'arbre, est défini comme la défaillance à étudier, et l'arbre est construit en établissant une liste de facteurs contributifs qui, ensemble ou séparément, pourraient conduire à cette défaillance (la relation entre ces facteurs est indiquée par des portes logiques « et/ou »)⁵¹. Ces facteurs contributifs sont ensuite décomposés en événements de base, qui composent l'arbre de défaillances ; il est ensuite possible de déterminer les coupes minimales, c'est-à-dire les plus petites combinaisons d'événements de base (défaillances de composants et de personnes) conduisant à l'événement principal (voir l'exemple d'arbre de défaillances illustré à la figure 5).

L'analyse par arbre de défaillances permet à l'équipe d'analyse de déterminer les causes possibles d'un événement de manière déductive, et de dégager les scénarios critiques. La structure de l'analyse par arbre de défaillances facilite la visualisation du danger et donne à l'équipe la possibilité d'étudier en détail un seul scénario ou danger à la fois⁵². Associé aux fréquences de défaillance, l'arbre de défaillances fournit des informations quantitatives sur le taux de défaillance, ce qui permet de repérer les chaînes d'événements qui présentent les risques les plus élevés et de définir les points sur lesquels la prévention et/ou l'atténuation doivent se concentrer. Lorsque la relation entre des événements d'un niveau donné est une relation « et », la probabilité de l'événement indésirable du niveau immédiatement supérieur est égale au produit des probabilités de défaillance de ces événements. Lorsque la relation entre des événements d'un niveau donné est une relation « ou », la probabilité de l'événement indésirable du niveau immédiatement supérieur est égale à la somme des probabilités de défaillance de ces événements. Il est également possible de calculer les fréquences d'occurrence. La méthode de l'arbre de défaillances permet également d'étudier et de prendre en compte l'efficacité des mesures

⁵¹ CCPS, *Guidelines for Hazard*.

⁵² Khan, « Techniques and Methodologies ».

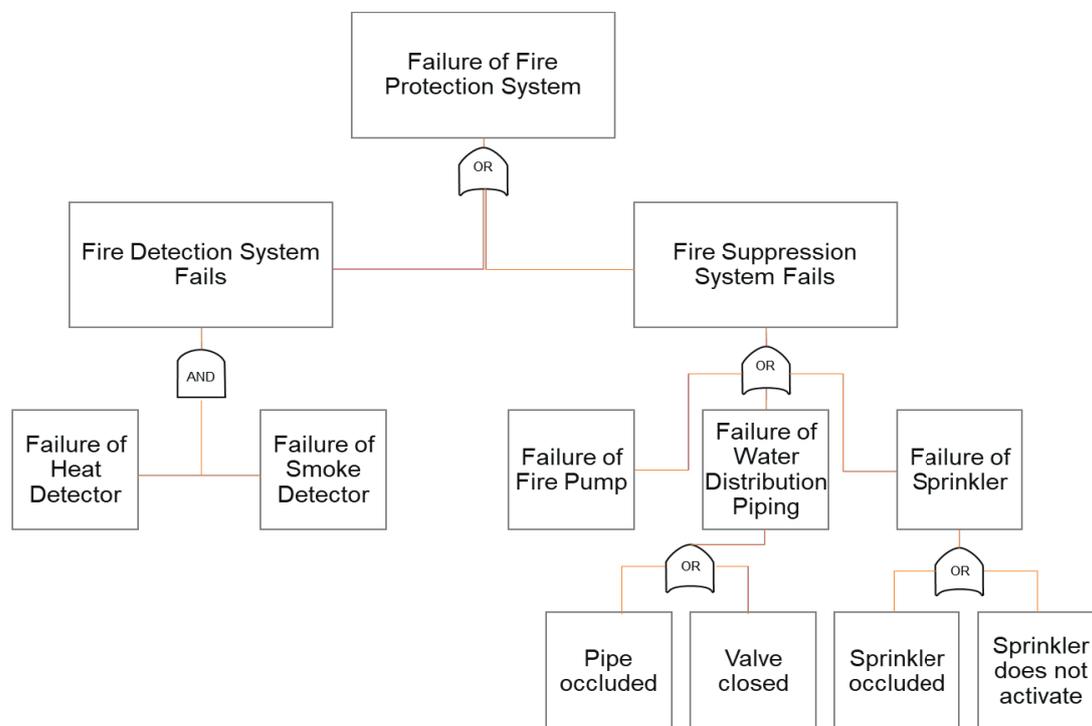
préventives⁵³ et de prendre en compte la « défaillance sur demande » (la probabilité qu'un système de sécurité ne soit pas en mesure de remplir sa fonction lorsqu'il est sollicité).

L'analyse par arbre de défaillances peut être complexe et nécessite une compréhension approfondie du système étudié. Cependant, elle est largement utilisée comme méthode de base pour évaluer les fréquences des événements dans le cadre de l'analyse quantitative des risques.

Une des limites de l'analyse par arbre de défaillances est que les données sur la fréquence de défaillance et la probabilité de défaillance sur demande des composants du système peuvent comporter un degré d'incertitude et être difficiles à trouver, en particulier si le système ou le composant est trop récent pour qu'on puisse disposer d'un solide historique opérationnel. Dans ce cas, il peut être nécessaire d'estimer ces données en recourant à des pratiques techniques reconnues ou en se servant de plages de valeurs assorties d'une analyse de sensibilité plutôt que de s'appuyer sur des valeurs isolées. Pour mettre en place un processus d'évaluation des risques harmonisé dans un pays, il est donc important que les propriétaires des installations et les autorités conçoivent ensemble des rapports ou des principes cadres au sein desquels des probabilités de défaillance uniformes sont définies.

Figure 5.

Exemple d'arbre de défaillances pour un système de protection contre l'incendie



Source : Auteur du présent rapport.

3.8. Analyse par arbre d'événement

L'analyse par arbre d'événements est une méthode inductive permettant de dresser la liste des différents scénarios qui pourraient découler d'un événement initiateur. L'arbre ainsi construit répertorie diverses séquences d'événements (bon fonctionnement ou défaillance d'un composant) découlant de l'événement initiateur, ainsi que leurs conséquences⁵⁴ (voir fig. 6).

Comme l'analyse par arbre de défaillances, l'analyse par arbre d'événements permet de visualiser les conséquences possibles d'un événement initiateur ; cependant, l'exercice peut être complexe et

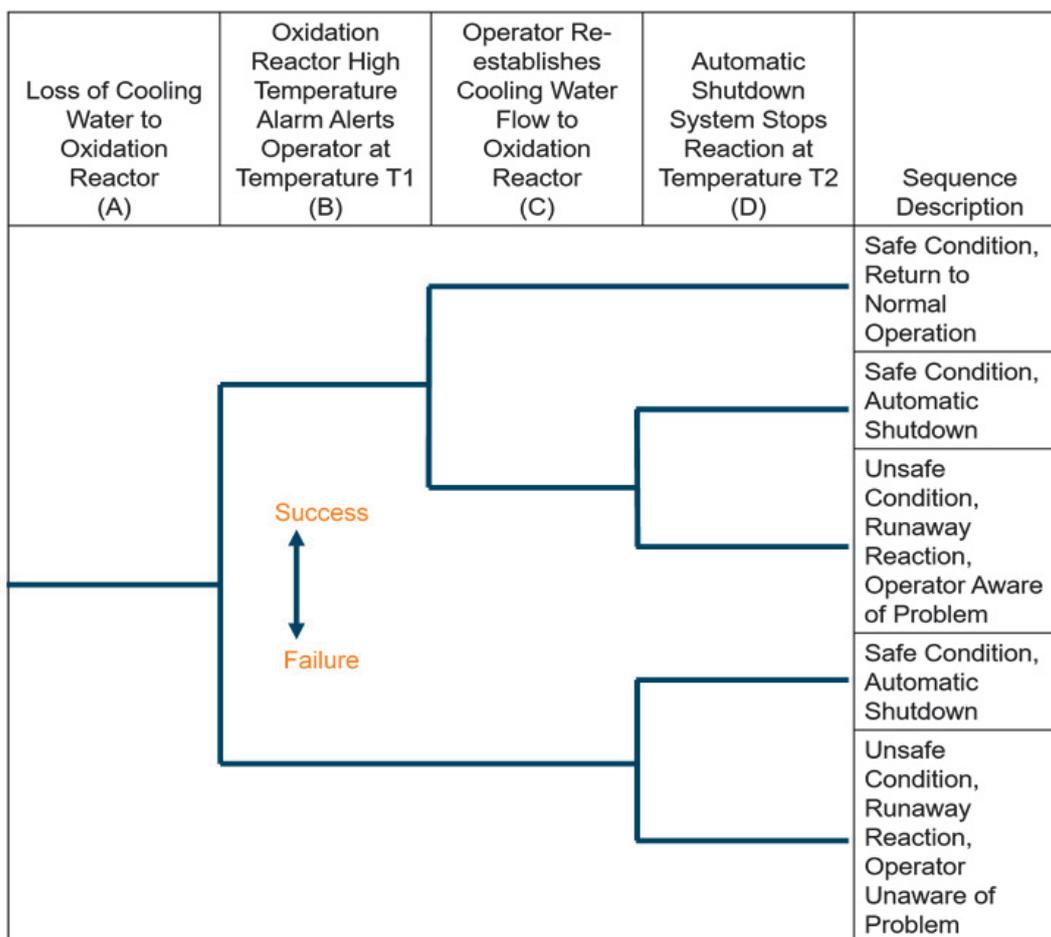
⁵³ Commission électrotechnique internationale (CEI), norme CEI 61025:2006, « Analyse par arbre de panne (AAP) » (décembre 2006).

⁵⁴ P. K. Marhvilas, « Risk analysis ».

chronophage. Les deux méthodes sont souvent liées en ce sens que l'analyse par arbre de défaillances se penche sur la probabilité que l'événement initiateur se produise, et que l'analyse par arbre d'événements examine la probabilité d'une ou plusieurs conséquences de l'événement initiateur. Par conséquent, l'analyse par arbre de défaillances étudie et prend en compte les mesures de prévention, l'analyse par arbre d'événements étudie et prend en compte les mesures d'atténuation. Comme pour l'analyse par arbre de défaillances, les données sur la fréquence de défaillance et la probabilité des conséquences ne sont pas toujours faciles à trouver, et il est nécessaire d'établir des estimations pour pouvoir procéder à une analyse quantitative.

Figure 6.

Arbre d'événements pour l'événement initiateur « interruption de l'alimentation du réacteur d'oxydation en eau de refroidissement »



Source : Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures: Third Edition* (American Institute of Chemical Engineers, 2008), p. 166.

3.9. Diagramme « nœud papillon »

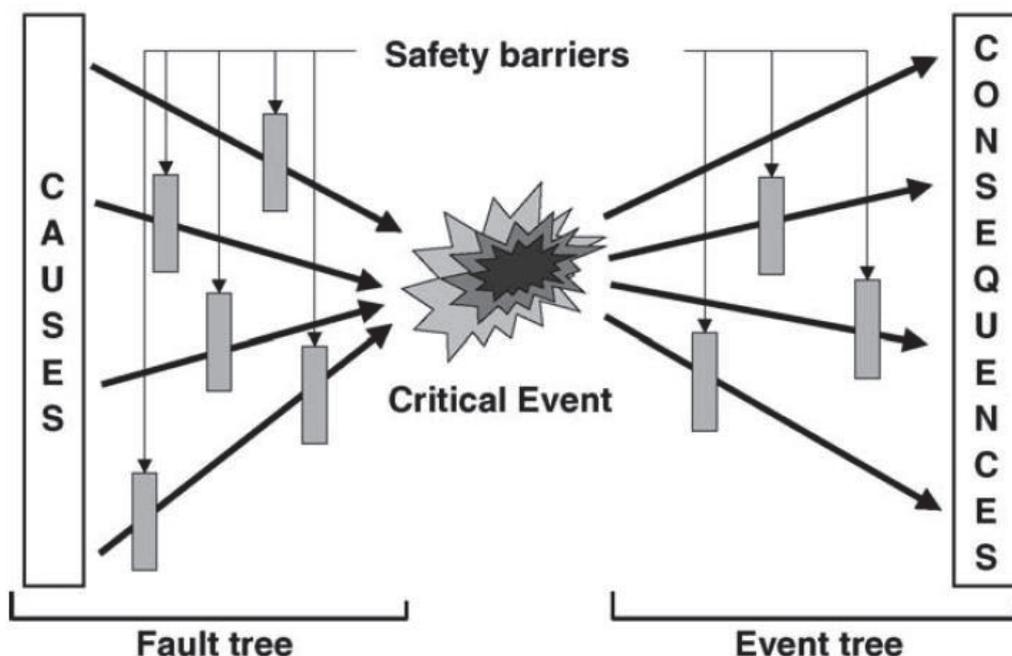
Le diagramme « nœud papillon » (fig. 7) est un outil d'analyse des risques basé sur des scénarios. Cette méthode est généralement considérée comme une association de l'analyse par arbre de défaillances et de l'analyse par arbre d'événements. La perte de confinement (ou tout autre événement initiateur) est placée au centre, ses causes à gauche et ses conséquences à droite.

Le diagramme « nœud papillon » est un outil puissant qui permet de représenter visuellement de manière claire et compacte les risques majeurs posés par des installations relativement simples (par exemple, des installations de stockage où les opérations sont par nature limitées), de communiquer et d'assurer la coordination avec les parties prenantes ayant moins de connaissances dans le domaine de l'évaluation des risques et de fournir un cadre clair pour la planification des interventions d'urgence en montrant les différents scénarios d'accident découlant d'un même événement, par exemple une perte de confinement, et les barrières de sécurité mises en place pour en atténuer les conséquences.

Bien que le diagramme « nœud papillon » soit surtout employé comme support visuel, il est possible d'y recourir pour réaliser une analyse quantitative des risques en utilisant les données de l'arbre de défaillances et de l'arbre d'événements ainsi que les données sur la probabilité ou la fréquence de défaillance des barrières de sécurité, afin de déterminer le risque associé à un événement donné.

Figure 7.

Diagramme « nœud papillon » établi dans le cadre du projet ARAMIS



Source : Valérie de Dianous et Cécile Fiévez, « ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, n° 3 (mars 2006), p. 221.

4. Éléments importants à prendre en compte dans le choix des outils d'analyse des risques

Le choix d'un outil d'analyse des risques dépend de plusieurs facteurs :

- Objectifs de l'entité qui fait l'objet de l'analyse des risques et niveau de rigueur requis ;
- Critères à respecter (par exemple, objectif en matière de risque quantitatif ou de matrice de risque) ;
- Connaissances du personnel et documentation pouvant servir de base pour l'analyse des risques ;
- Complexité du processus ;
- Ampleur relative du danger et niveaux de risques potentiels ;
- Phase de conception du projet.

Le niveau de rigueur de la méthode d'analyse des risques (par exemple, qualitative ou quantitative) peut être défini en fonction de la complexité du procédé, du type d'industrie ou les exigences légales du pays. Les procédés et les dangers simples peuvent être traités de manière adéquate à l'aide d'une méthode qualitative, alors qu'un procédé complexe peut nécessiter une méthode quantitative. Le tableau 5 résume les avantages et les inconvénients des différentes méthodes d'analyse des risques abordées dans la présente section.

Tableau 5.
Comparaison des outils et des méthodes d'analyse des risques

<i>Méthode/outil</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Étapes applicables de l'évaluation des risques (voir fig. 2)</i>
« What if » (« Que se passe-t-il si ? »)/liste de contrôle	Répertorie les dangers ou les événements accidentels particuliers qui pourraient avoir des conséquences indésirables Relativement facile à appliquer	Détermine uniquement les conséquences du danger Outil peu structuré	Identification des risques : Identification des dangers et des éléments vulnérables
HazOp	Méthode systématique d'identification et de documentation des dangers faisant appel à l'imagination Évaluation simultanée des causes et des conséquences des écarts Intrinsèquement complète	Ne comprend pas le classement des risques Chronophage Nécessite une connaissance détaillée du procédé ; peut ne pas convenir aux applications transfrontières en raison d'éventuels secrets commerciaux	Identification des risques : Identification des dangers et des éléments vulnérables
HazOp avec niveaux de risque	Mêmes avantages qu'HazOp, plus : Applicable à tout système ou procédure Comprend le classement des risques pour mieux définir les dangers et les mesures de réduction des risques nécessaires	Chronophage Nécessite de mettre en place une équipe multidisciplinaire L'identification des risques repose sur l'expérience de l'équipe HazOp, qui peut être limitée	Identification des risques : Identification des dangers et des éléments vulnérables
AMDE/ AMDEC	Méthode d'analyse inductive permettant de repérer les modes de défaillance grâce à l'analyse systématique de chaque composant du système Peut être étendue à une méthode quantitative en ayant recours à l'analyse de la criticité (AMDEC)	Peu de données pratiques sur les défaillances des nouveaux systèmes Il peut être difficile de se concentrer sur les défaillances les plus critiques	Analyse des risques : Formulation des scénarios d'incidents dangereux et définition des mesures d'atténuation
LOPA	Demande moins de temps et d'efforts qu'une méthode entièrement quantitative Permet de définir plus facilement et de manière plus précise des paires cause-conséquence Permet de bien appréhender les couches de protection	Ne repère pas systématiquement les dangers Doit reposer sur un outil d'analyse des dangers Peut ne pas être efficace pour les scénarios complexes	Analyse des risques : Définition des mesures d'atténuation, estimation des fréquences

<i>Méthode/outil</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Étapes applicables de l'évaluation des risques (voir fig. 2)</i>
Analyse des conséquences	Si elle est réalisée correctement, donne des résultats fiables (niveau de confiance élevé) et des arguments solides pour justifier la prise de décisions après évaluation des risques	Nécessite d'élaborer des scénarios entièrement quantitatifs et des modèles d'effets Nécessite une vérification et une validation pour garantir l'exactitude des résultats	Analyse des risques : Estimation des conséquences
Analyse par arbre de défaillances	Répertorie et modélise les combinaisons de défaillances de l'équipement, d'erreurs humaines et de conditions extérieures conduisant à un accident Permet à l'équipe d'étudier en détail un seul scénario ou danger à la fois Méthode de modélisation déductive Méthode très structurée Détermine les causes de manière approfondie Permet de bien visualiser le système et les modes de défaillance	Utilisée plus souvent comme approche orientée système que comme approche orientée conséquences Nécessite de disposer de données sur la fréquence de défaillance des équipements	Analyse des risques : Estimation des fréquences
Analyse par arbre d'événements	Méthode très structurée Détermine les causes de manière approfondie Permet de bien visualiser les résultats	Les données sur la fréquence de défaillance et la probabilité des conséquences ne sont pas toujours faciles à trouver Peut nécessiter de recourir également à l'analyse par arbre de défaillances	Analyse des risques : Estimation des fréquences
Diagramme « nœud papillon »	Permet de bien visualiser les scénarios d'accidents Peut être utilisé de manière qualitative	Nécessite de mener une analyse par arbre de défaillances et une analyse par arbre d'événements pour permettre une compréhension approfondie	Analyse des risques : Définition des mesures d'atténuation

Sources : Auteur du présent rapport, d'après des informations tirées de CCPS, *Guidelines for Hazard* ; Mannan, *Lees' Loss* ; Peeters, « Improving failure analysis ».

5. Résultats de l'étape d'analyse des risques

Les résultats de l'analyse des risques servent de base à l'étape suivante, l'appréciation des risques. Les résultats typiques de l'analyse des risques comprennent :

- a) Une liste des scénarios étudiés, avec les causes et les conséquences ;
- b) Les niveaux de risque calculés ou déterminés pour chaque scénario (par exemple, le risque de décès dû à la rupture d'une cuve de traitement en raison d'une surpression) ;

- c) Dans un contexte transfrontière, les méthodes appropriées pour transmettre les informations sur les risques, y compris les courbes représentant le risque individuel en un point donné, le risque sociétal ou les conséquences directes ;
- d) Une évaluation des conséquences en fonction des valeurs seuils (écotoxicité) permettant de documenter les impacts sur l'environnement ;
- e) Courbes fréquence-gravité (courbes F/N).

C. Appréciation des risques

L'étape suivante consiste à apprécier les risques, une fois que les niveaux de risque des scénarios sélectionnés ont été déterminés. Cette étape permet de définir un niveau ou une plage de risque (calculés ou estimés) acceptables pour les parties prenantes.

1. Critères d'acceptabilité des risques

Pour déterminer si un événement ou un scénario de défaillance étudié est acceptable pour les parties prenantes en l'absence de mesures de sécurité supplémentaires, il faut établir un niveau ou une plage de risque acceptables. Ce risque « acceptable » doit être préalablement défini au cours de l'élaboration du cadre d'évaluation des risques, et il doit être accepté par les parties prenantes ou prescrit dans un cadre juridique par les autorités. Ces critères peuvent varier en fonction de la population concernée (par exemple, sur site, hors site, récepteurs sensibles, éléments environnementaux vulnérables tels que les eaux de surface et les eaux souterraines, etc.) et de l'aversion au risque de la collectivité. Il est important de noter que les aspects culturels, géographiques et politiques de l'acceptabilité des risques peuvent se traduire par une grande variabilité des critères d'acceptabilité au sein d'un groupe de pays ou de parties prenantes. Les critères doivent être élaborés et appliqués conformément à la méthodologie d'analyse des risques et aux exigences des parties prenantes :

- a) Critères qualitatifs : niveaux de risques indiqués sous la forme « élevé/moyen/faible » ;
- b) Critères semi-quantitatifs : niveaux de risques numérotés ;
- c) Critères quantitatifs : objectifs chiffrés en matière de risque.

1.1. Critères de risque qualitatifs ou semi-quantitatifs

Une matrice de risque est un outil typique mis au point par les parties prenantes pour représenter qualitativement un profil de risque comprenant plusieurs niveaux. En général, la gravité est axée sur l'exposition du personnel (blessure, invalidité, décès, etc.), mais d'autres facteurs tels que les dommages matériels, les impacts environnementaux, l'interruption des activités et les impacts sur la réputation peuvent être pris en compte. Le tableau 6 illustre un exemple de matrice de risque et de description des niveaux.

Tableau 6.
Exemple de matrice de risque

		Frequency					
		1 Not likely to ever happen anywhere	2 Never happened in the industry	3 Not likely to happen in the process lifetime	4 May happen in process lifetime	5 Multiple occurrences in process lifetime	6 Multiple instances / year
Severity	1 – No effect	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	2 – Minor injury	Green	Green	Green	Green	Yellow	Orange
	3 – Major injury	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange
	4 – Irreversible or multiple injury	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange	Red
	5 – Single fatality	Green	Yellow	Yellow	Orange	Red	Red
	6 – Multiple fatality	Yellow	Yellow	Orange	Red	Red	Red

Source : Auteur du présent rapport.

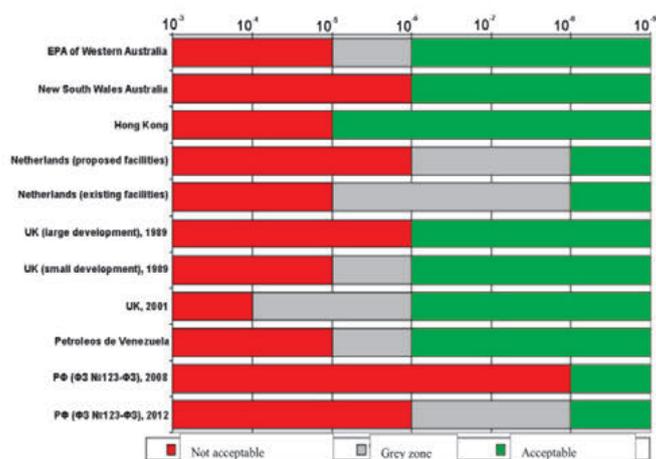
Les catégories de risque sont prédéterminées en fonction des contributions des parties prenantes, et les scénarios associés à des niveaux de risques élevés nécessiteront des mesures de réduction des risques. Dans le tableau 6, le niveau de risque vert indique généralement un risque acceptable ne nécessitant aucune mesure supplémentaire, le niveau de risque jaune correspond à un risque tolérable qui implique d'examiner les mesures recommandées, et les niveaux de risque rouge et orange signifient que le risque est intolérable ou inacceptable et que des mesures de réduction des risques doivent être prises.

1.2. Critères de risque individuel

Les critères de risque utilisés pour l'analyse quantitative des risques doivent être chiffrés. Lorsqu'on examine les conséquences possibles d'un accident industriel pour une personne, on utilise des critères de risque individuel.

Il est difficile de parvenir à une définition de « risque acceptable » qui fasse consensus entre les parties prenantes, en particulier dans un contexte transfrontière. Les ordres de grandeur des valeurs seuils des niveaux de risque acceptable ou inacceptable peuvent varier considérablement (voir fig. 8). Il est donc prudent de procéder à des ajustements ultérieurs afin d'améliorer la cohérence entre les parties prenantes⁵⁵.

Figure 8.
Comparaison des critères d'acceptabilité du risque individuel par pays (probabilité d'exposition d'une personne à un danger mortel en un an)



Source : Mikhail Lisanov, « Methodological framework for risk assessment in the Russian Federation », présentation donnée lors du séminaire de la CEE sur les méthodes d'évaluation des risques (Genève, 4 Décembre 2018).

Abréviations : EPA = Agence de protection de l'environnement ; Hong Kong = Hong Kong (Chine) ; UK = Royaume-Uni.

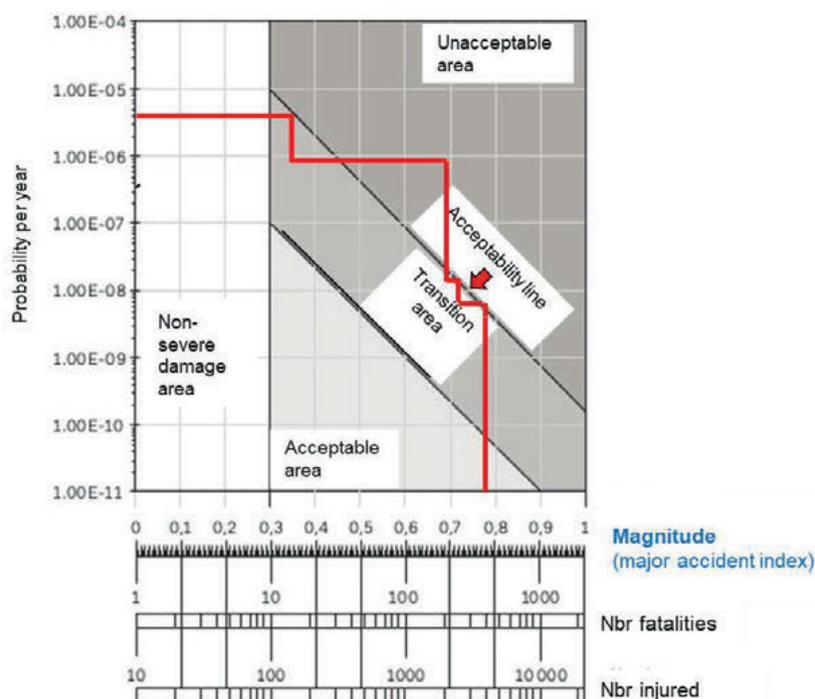
1.3. Critères de risque sociétal

Les critères de risque sociétal sont utilisés dans les appréciations des risques lorsqu'il s'agit d'examiner les risques auxquels sont exposées plusieurs personnes ou une population (voir fig. 9).

⁵⁵ Résumé du séminaire de la CEE sur les méthodes d'évaluation des risques (2018) (https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2018/TEIA/Report_of_the_UNECE_risk_assessment_seminar_4_December_2018.pdf).

Figure 9.

Critères d'appréciation de la Suisse basés sur les courbes fréquence-gravité (courbes F/N)



Source : M. Merkofer et al., « Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung », Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2018.

2. Principe « As Low as Reasonably Practicable/Achievable » (ALARP/ALARA)

Le principe d'optimisation ALARP/ALARA (aussi faible que raisonnablement possible), prédominant aux États-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, est une méthode utilisée lorsque le niveau de risque résiduel, après application des procédures de maîtrise des risques, se trouve dans la zone grise entre « acceptable » et « intolérable ». Partant du constat qu'il est impossible de ramener le risque à zéro, car le coût serait exorbitant, le principe ALARP/ALARA permet aux utilisateurs de mettre en balance la réduction du risque et les avantages pour la société. Pour qu'un risque soit considéré comme réduit à un niveau aussi faible que raisonnablement possible, l'utilisateur doit démontrer que les coûts associés à une réduction supplémentaire du risque sont « manifestement disproportionnés » par rapport au bénéfice obtenu⁵⁶. Les termes « raisonnablement possible » et « manifestement disproportionné » relèvent du domaine juridique ; l'interprétation exhaustive de ces termes dépasse le cadre du présent document.

3. Analyse coûts-avantages

L'analyse coûts-avantages est une méthode systématique permettant d'estimer les avantages et les inconvénients des mesures de réduction des risques envisageables en tenant compte de leur coût économique. On détermine les courbes de risque avec et sans mesures de sécurité supplémentaires ; on calcule ensuite les coûts associés à ces mesures de sécurité et on les compare aux avantages, traduits en termes monétaires, qui en découlent sur le plan des risques.

S'agissant de l'évaluation des risques posés par les installations chimiques, l'un des principaux atouts de l'analyse coûts-avantages est qu'elle permet de choisir entre plusieurs solutions comparables de réduction de risques. De nombreuses méthodes sont disponibles, notamment la « note de risque » qualitatif obtenue, la recherche du moyen le plus économique de réduire le risque à un niveau acceptable ou d'atteindre le point à partir duquel le coût d'une réduction supplémentaire du risque serait « manifestement disproportionné ».

Il peut être difficile de mener une analyse coûts-avantages chiffrée dans le cadre de l'évaluation des risques compte tenu de la complexité des systèmes de sécurité et des coûts du cycle de vie associés,

⁵⁶ CCPS, *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*.

notamment la maintenance, l'inspection et les temps d'indisponibilité. Plus précisément, les coûts d'exploitation liés à la mise en œuvre des systèmes instrumentés de sécurité (SIS) ont tendance à être très élevés, en raison de la maintenance et des tests nécessaires, mais aussi à cause des interférences et des fausses manipulations qui peuvent être difficiles à quantifier. Il est donc généralement recommandé de faire appel aux ordres de grandeur pour comparer les solutions de sécurité. D'autres aspects (par exemple, la facilité de mise en œuvre) peuvent également être pris en compte.

L'application de l'analyse coûts-avantages à la sécurité des personnes présente des difficultés considérables, notamment en raison des conséquences politiques et sociales qui découlent de l'attribution d'une valeur monétaire à la vie humaine et du choix de calculer les coûts en se fondant sur l'historique des événements plutôt que sur le pire accident possible. Certaines parties prenantes peuvent également négliger ou ignorer l'existence des dispositifs de sécurité déjà mis en œuvre, qui assurent la majeure partie de la réduction des risques et sont pris en compte avant l'étude coûts-avantages. Par conséquent, l'utilisation de l'analyse coûts-avantages aux fins de la réduction des risques est généralement limitée et se concentre sur les risques environnementaux (et autres risques ne concernant pas les personnes). En voici quelques exemples :

- a) Le Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, qui applique l'analyse coûts-avantages à la réduction des risques selon le principe ALARP (voir sect. C.2) en se basant sur une décision de justice fixant le montant qu'une entreprise devrait être prête à dépenser pour sauver une vie⁵⁷ ;
- b) La Suisse, qui applique l'analyse coûts-avantages aux risques environnementaux⁵⁸.

V. Avantages et inconvénients des évaluations des risques

A. Avantages des évaluations des risques et de l'application des méthodes d'évaluation des risques

1. Aspects transfrontières

Lorsqu'elles sont appliquées dans un contexte transfrontière et qu'elles font l'objet d'une communication adéquate, les évaluations des risques peuvent faciliter le partage d'informations et la compréhension des différentes méthodes utilisées et contribuer à l'amélioration de la gestion des risques communs et au renforcement des mesures de prévention, de préparation et d'intervention applicables aux accidents industriels.

2. Aménagement du territoire et protection des populations et des travailleurs

Dans une installation chimique, il est primordial de circonscrire les risques d'accident majeur au périmètre de ladite installation. Cela n'est cependant pas toujours possible lorsque de grandes quantités de substances dangereuses sont en jeu ou lorsque l'espace est limité. Il est donc indispensable de procéder à une analyse quantitative des risques pour décider de l'aménagement du territoire et assurer la protection des populations, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des frontières nationales.

Les évaluations des risques peuvent faciliter l'aménagement du territoire en associant à chaque type d'utilisation des terres un ordre de grandeur approximatif des risques (voir fig. 10). Plusieurs organisations ont élaboré des directives techniques concernant cette application précise⁵⁹. Le fait de mettre en parallèle les résultats des évaluations des risques que présente une installation et les caractéristiques des futures utilisations potentielles des zones adjacentes permet d'éviter les

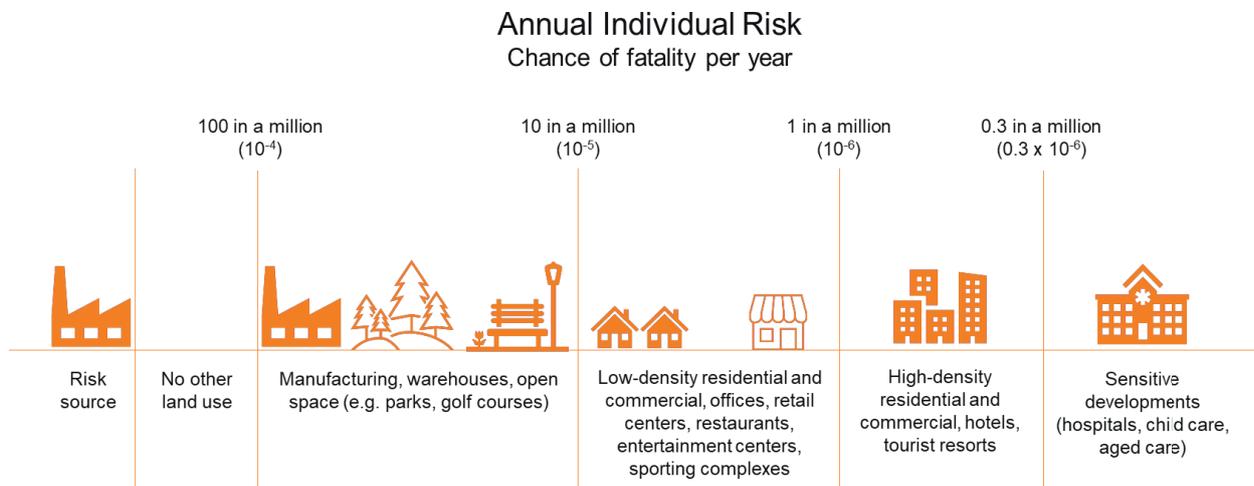
⁵⁷ Health and Safety Executive, « Appraisal values or 'unit costs' » (www.hse.gov.uk/economics/eauappraisal.htm).

⁵⁸ M. Merkofer et al., « Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung » (Berne, Office fédéral de l'environnement, 2018).

⁵⁹ Conseil canadien des accidents industriels majeurs (CCAIM), *Risk-based Land-use Planning Guidelines* (Ottawa, 1995).

expositions critiques. On peut par exemple superposer la carte des rejets toxiques à celle des espaces publics extérieurs très fréquentés.

Figure 10.
Zonage et utilisations autorisées



Source : Conseil canadien des accidents industriels majeurs (CCAIM), *Risk-based Land-use Planning Guidelines* (Ottawa, 1995).

Les décideurs devraient prendre les mesures appropriées en vue d'atténuer les risques existants pour les populations et l'environnement, en tenant compte des informations issues de l'évaluation des risques et d'autres sources telles que les évaluations de l'impact sur l'environnement. De plus amples informations sur ce qui constitue une approche cohérente et intégrée de l'évaluation environnementale et de l'évaluation des risques sont disponibles dans le Document d'orientation sur l'aménagement du territoire⁶⁰, qui vise à aider les Parties à s'acquitter des obligations qui leur incombent au titre de la Convention sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transfrontière, de son Protocole relatif à l'évaluation stratégique environnementale et de la Convention sur les accidents industriels.

3. Préparation aux situations d'urgence

La connaissance préalable des conséquences potentielles hors site permet aux services d'interventions d'urgence de planifier les mesures prioritaires, notamment la sécurisation des limites du site, la diffusion d'un message appelant la population à se confiner, la préparation des prestataires de santé à l'application de protocoles de traitement précis et la mise en place d'une surcapacité temporaire pour les secours d'urgence. Le Groupe de la coordination interinstitutions sur les accidents industriels et chimiques a mis l'accent sur cette idée⁶¹.

4. Communication et coordination entre les parties prenantes et au-delà des frontières nationales

L'évaluation des risques est menée par une équipe pluridisciplinaire. Les séances de réflexion favorisent la participation et améliorent la communication et la coordination entre les parties prenantes (exploitants, travailleurs, autres membres du personnel de l'installation, population hors site, organismes de réglementation, groupes d'intérêt, autorités de contrôle locales et voisines) et au-delà des frontières nationales. La communication entre les parties prenantes dans ce cadre peut favoriser une prise de conscience des risques, le soutien de la direction et la prise de décisions concertées et réduire l'aversion au risque au sein de la collectivité.

⁶⁰ Document d'orientation sur l'aménagement du territoire, le choix des sites d'activités dangereuses et les aspects de sécurité s'y rapportant (publication des Nations Unies, ECE/CP.TEIA/35).

⁶¹ Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), « International efforts for industrial and chemical accidents prevention, preparedness and response », brochure (s. d.).

5. Méthodes harmonisées de classement et de maîtrise des risques

L'application de méthodes d'évaluation des risques complètes, systémiques, bien décrites et normalisées conduit à des évaluations objectives, qui favorisent la prise de décisions plus cohérentes en matière de gestion des risques. Le classement des principaux scénarios et l'identification des principaux facteurs de risque permettent de prendre des mesures d'atténuation appropriées et de réduire ainsi le niveau de risque global d'une installation de la manière la plus efficace possible. Grâce à une estimation précise de la probabilité des scénarios menant à une catastrophe, il est possible de repérer les principaux facteurs de risque et de mobiliser des ressources en vue de réduire la probabilité que les risques associés à ces facteurs se concrétisent et que la catastrophe se produise⁶². Des critères uniformes d'évaluation des risques permettent de garantir un niveau de protection élevé et homogène des populations et de l'environnement. Un réexamen régulier des évaluations des risques peut alimenter un cercle vertueux.

6. Démonstration de la défense en profondeur

Le concept de défense en profondeur appliqué à l'industrie chimique est lié à celui de « couches de protection » (voir sect. B.3.5) : il consiste à créer de multiples couches de défense indépendantes pour prévenir les accidents majeurs et en atténuer les conséquences. Les méthodes d'analyse des risques permettent d'étudier de manière systémique et détaillée les déviations de procédé et de créer plusieurs couches de protection (certaines méthodes, comme le diagramme « nœud papillon », permettent également de visualiser ces couches).

B. Inconvénients des évaluations des risques et de l'application des méthodes d'évaluation des risques

1. Limites inhérentes aux méthodes d'analyse des risques

Certaines méthodes d'analyse des risques peuvent représenter le déroulé d'un accident de manière simplifiée, être peu détaillées et ne pas permettre de répertorier toutes les causes ou conséquences potentielles d'un scénario donné (par exemple, les effets domino). Ces limites et inconvénients sont énumérés ci-dessous :

- a) Sélection des scénarios et des paramètres : la description ou la sélection des scénarios peut varier en fonction de l'appréciation ou de l'expérience de l'équipe de gestion des risques, ce qui se traduit par l'absence d'uniformité de l'approche adoptée. De même, la sélection des paramètres (par exemple, la durée d'un événement) peut modifier le résultat de l'analyse des risques et repose souvent sur l'appréciation des experts ;
- b) Nombre de scénarios : l'analyse des risques repose sur un petit nombre de scénarios (parfois même un seul). Il se peut qu'une catastrophe différente de celles qui ont été envisagées dans l'analyse se produise et qu'elle nécessite une stratégie d'intervention autre que celle qui a été établie. Il est donc possible que toutes les conséquences ne soient pas envisagées ou qu'il n'en soit pas donné une représentation précise ;
- c) Données nécessaires : mener une analyse des risques nécessite en général de disposer d'un grand nombre de paramètres et de variables d'entrée, le plus souvent de nature quantitative. Les parties prenantes n'ont pas toujours facilement accès à des données précises et représentatives. Les estimations utilisées à la place de données précises peuvent comporter une part d'incertitude ;
- d) Incertitude inhérente : les variables utilisées dans l'analyse des risques ne sont pas précises ; ainsi, il est impossible de prévoir les conditions météorologiques à l'instant précis où un accident se produit, et l'état du terrain, du procédé et du stockage peut avoir changé depuis l'analyse des risques⁶³. Cette variabilité entraîne une incertitude inhérente à l'analyse ;

⁶² Jérôme Taveau et Jensen Hughes, « Ingénierie de la sécurité incendie – Évaluation du risque d'incendie – Partie 3 : Exemple d'un complexe industriel », ISO/TR 16732-3. ISO, Genève (2013).

⁶³ Maureen Heraty Wood et Luciano Fabbri, « Challenges and opportunities for assessing global progress in reducing chemical accident risks », *Progress in Disaster Science*, vol. 4 (décembre 2019).

- e) Non-universalité : les analyses des risques sont élaborées en tenant compte des particularités d'un site donné. Elles ne sont pas transposables d'un site ou d'une installation à l'autre, même si ceux-ci sont très similaires : elles doivent être adaptées à chaque installation et à chaque procédé ;
- f) Résultats : les résultats d'une analyse des risques ne sont pas des vérités absolues ; ils mettent en évidence un risque relatif correspondant à un scénario et à des conditions données. En outre, la fiabilité et la précision des résultats sont souvent surestimées.

2. Terminologie

Il est indispensable que les parties prenantes adoptent une terminologie commune en matière d'évaluation des risques afin de prendre des décisions fondées sur une compréhension mutuelle. Dans la pratique, cela dit, les termes utilisés par les professionnels, les institutions ou les pays pour désigner les mêmes concepts peuvent varier. En outre, leurs définitions peuvent évoluer dans le temps, à mesure que les concepts existants sont affinés ou que de nouveaux concepts sont introduits. L'établissement d'une terminologie commune peut se révéler difficile ; il existe peu de glossaires complets couvrant tous les aspects de l'évaluation des risques.

3. Formation, expérience et compétences

Les évaluations des risques que présentent les installations chimiques, lesquelles reposent sur des systèmes complexes, doivent être menées par des personnes qualifiées. Les équipes doivent conjuguer formation, expérience et compétences dans des domaines ciblés, tels que le génie chimique, la sécurité des procédés et la prévention des accidents, pour être à même de comprendre les concepts de base des méthodes d'évaluation et d'atténuation des risques et de les appliquer. Il demeure difficile de constituer une équipe dotée de l'expertise adéquate (notamment quant à la formation), car peu d'universités proposent une spécialisation en sécurité des procédés. Ces dernières années, certaines organisations (comme l'American Institute of Chemical Engineers et l'Institution of Chemical Engineers) ont établi des dispositifs de certification de la formation suivie et de l'expérience acquise dans le domaine de la sécurité des procédés et de la prévention des accidents, mais une certification professionnelle plus globale fait toujours défaut.

4. Bases de données sur la fréquence des événements

Il existe peu de bases de données comportant des valeurs absolues de fréquence de survenue d'événements liés à des activités dangereuses. Celles qui existent sont assez anciennes et peu fournies (compte tenu du faible nombre d'accidents majeurs), ce qui entache les données d'incertitude d'un point de vue statistique.

Les bases de données génériques de l'industrie ne fournissent pas beaucoup de détails et peu d'experts sont conscients des limites qui leur sont inhérentes, car déterminer l'origine des données est dans la plupart des cas impossible (ou demande d'importants efforts de recherche). Les données provenant d'autres domaines de l'ingénierie, notamment celles qui sont utilisées pour calculer la probabilité de défaillance sur demande, sont difficiles à transposer aux installations chimiques, toujours en raison de la diversité des équipements, des substances dangereuses et des conditions d'exploitation.

Peu d'initiatives visant à rassembler et à valider les données sur la fréquence des événements ont été entreprises dans l'industrie chimique en raison des contraintes qui lui sont inhérentes et des efforts nécessaires pour créer et mettre à jour une telle base de données⁶⁴.

5. Quantification des impacts sur l'environnement

L'évaluation des causes (en cas d'accident technologique provoqué par un aléa naturel, ou NaTech) et des conséquences environnementales des accidents est souvent négligée dans les évaluations des risques, compte tenu du manque de méthodes et de modèles physiques solides accessibles au public. Dans la pratique, cette évaluation reste difficile en raison des nombreuses variables qu'il faudrait prendre en compte. Il existe un outil consacré aux accidents NaTech, à savoir le logiciel RAPID-N,

⁶⁴ J. R. Taylor, « Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant – Volume II: Process Unit Release Frequencies », version 1, n° 7. Allerød, Danemark (2006).

développé par le Centre commun de recherche de la Commission européenne. L'élaboration et la diffusion de modèles physiques décrivant les mécanismes de pollution de l'eau et du sol (expressément destinés aux analyses de sécurité) aideraient les professionnels à mener à bien cette tâche plutôt difficile.

6. Connaissances limitées des logiciels et difficulté d'accès à ces outils

Divers logiciels permettant de réaliser tout ou partie d'une évaluation des risques sont disponibles dans le commerce (voir seconde partie, annexe). Il est ressorti du séminaire de la CEE sur les méthodes d'évaluation des risques organisé en 2018 que ces outils étaient peu connus. De surcroît, ils ne sont pas toujours très accessibles, car le coût des licences et de leur renouvellement est généralement élevé. Par conséquent, le propriétaire d'une installation risque de ne pas utiliser le logiciel le plus adapté à son cas de figure ou de n'acheter et renouveler que la licence d'un seul outil, qui pourrait ne pas être adapté à tous les scénarios à étudier. De plus, si l'exploitant utilise un logiciel différent de celui dont se sert l'organisme de réglementation, la communication avec l'inspecteur ou l'organisme de réglementation peut être compliquée.

7. Utilisation de technologies de pointe

Le niveau de technologie associé à un procédé ou à une installation est par nature considéré comme le point de départ de l'évaluation des risques. Les pays dont le niveau de technologie initial est faible peuvent devoir prendre des mesures de sécurité supplémentaires pour atteindre un niveau de risque acceptable, alors que d'autres pays disposent de technologies avancées qui intègrent ces mesures de sécurité supplémentaires.

VI. Conclusions

Le présent rapport contient un aperçu général des méthodes d'évaluation des risques applicables à diverses activités dangereuses. Les principales conclusions de la première partie sont les suivantes :

- a) L'évaluation des risques est importante pour éclairer la prise de décisions relatives à la prévention et l'atténuation des accidents industriels, et ses résultats doivent être pris en compte pour l'aménagement du territoire et le choix des sites d'activités dangereuses ;
- b) Les pays voisins et riverains, et au-delà, tous les pays de la région de la CEE, doivent partager des informations afin que les différentes méthodes d'évaluation des risques soient mieux connues et comprises, et que leurs résultats soient mieux utilisés, par exemple aux fins des consultations liées à la notification des activités dangereuses ;
- c) À plus long terme, il est important d'harmoniser les définitions des termes couramment utilisés dans l'évaluation des risques (voir sect. B), afin que les différentes parties prenantes puissent en avoir une compréhension commune malgré la diversité de leurs profils et de leurs rôles ;
- d) Il est important de disposer d'un cadre contextuel définissant la manière dont l'évaluation des risques s'inscrit dans le processus global de gestion des risques (voir sect. C et fig. 1) ;
- e) Il est essentiel de décrire les différentes méthodes d'évaluation des risques disponibles et de préciser les conditions dans lesquelles elles sont appropriées (voir sect. III), ces méthodes étant subdivisées en trois catégories : identification des risques (sect. A), analyse des risques (sect. B) et appréciation des risques (sect. C).

Dans la seconde partie sont présentées des études de cas qui montrent la manière dont les méthodes d'évaluation des risques ont été appliquées aux installations chimiques de la région de la CEE, y compris dans un contexte transfrontière. À l'annexe de la seconde partie, des précisions sont données sur les outils logiciels qui permettent de prendre en charge les différents aspects de l'évaluation des risques dans les installations chimiques.



Seconde partie
Études de cas et outils logiciels

I. Introduction et sélection des études de cas

Dans le présent rapport sont exposées des études de cas d'application de méthodes d'évaluation des risques à des installations chimiques de la région de la Commission économique pour l'Europe (CEE). Ces études de cas couvrent cinq types d'installations : les réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL)/gaz de pétrole liquéfié (GPL) ; les installations de réfrigération à l'ammoniac ; les terminaux pétroliers (installations de chargement/déchargement/stockage d'hydrocarbures) ; les installations de stockage de nitrate d'ammonium ; les installations de production de chlore. À l'annexe du présent rapport figure une liste des principaux outils logiciels d'évaluation des risques liés aux installations chimiques.

Plusieurs pays de la CEE ont été invités à soumettre des études de cas sur les cinq types d'installations susmentionnés, en communiquant des informations sur la base d'un modèle. Parmi les études de cas soumises, cinq études transfrontières ont été présentées par trois pays. Dix-huit des 30 études de cas soumises, dont trois études transfrontières, ont été retenues du fait de l'intérêt que présentaient la situation géographique, le type d'installation ou les considérations transfrontières. Certains pays, dont ceux d'Europe orientale, du Caucase et d'Asie centrale, n'ont pas soumis d'études de cas en raison du caractère confidentiel des informations demandées.

Le présent rapport doit être lu en parallèle avec le rapport intitulé « Évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels : Aperçu des méthodes d'évaluation des risques » (ci-après dénommé « première partie ») (ECE/CP.TEIA/2022/8). La première partie offre un aperçu général des méthodes d'évaluation des risques applicables aux risques découlant d'activités dangereuses.

II. Informations clefs demandées

Un modèle de présentation de l'information a été fourni de sorte que, dans un souci de cohérence, toutes les réponses soient structurées comme suit :

- a) Scénarios d'incidents majeurs (toutes les études de cas) : résumé des scénarios d'incidents pris en compte dans l'évaluation des risques, concernant généralement une défaillance du confinement de la principale matière dangereuse, et parfois des effets de réaction ou de combustion subséquents ;
- b) Examen des conséquences des rejets (toutes les études de cas) : examen des conséquences telles que les décès, les blessures, les effets environnementaux et les dommages hors site, y compris grâce à des bases de données et à des logiciels de modélisation ;
- c) Probabilité d'occurrence (toutes les études de cas) : examen des causes possibles de l'incident et estimation de sa probabilité, notamment au moyen de bases de données ;
- d) Présentation des risques (toutes les études de cas) : évaluation de la manière dont les données relatives à la probabilité et à la gravité des incidents ont été combinées et communiquées, y compris la nature des analyses réalisées (qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives) et les méthodes de présentation des critères de notation des risques ;
- e) Critères d'acceptabilité des risques (toutes les études de cas) : examen des critères d'acceptabilité des risques appliqués, en fonction des réglementations du pays/de la région et des parties prenantes concernées ;
- f) Mesures de réduction des risques mises en œuvre (certaines études de cas) : Des mesures supplémentaires de réduction des risques ont parfois été prises sur la base des résultats de l'évaluation des risques, notamment des mesures de prévention, de préparation et d'intervention.

Dans certaines études de cas, il n'était pas précisé si les mesures de réduction des risques avaient été prises expressément à la lumière des résultats de l'évaluation des risques ou par défaut, en tant que bonnes pratiques de sécurité chimique. Dans les tableaux récapitulatifs ci-dessous, l'auteur a ajouté l'adjectif « supplémentaires » dans le premier cas (« mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre »), et un astérisque (*) dans le second.

III. Présentation des études de cas

A. Gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié

1. Finlande

L'installation, d'une superficie d'environ 75 000 m², est située en bord de mer, à moins d'un kilomètre d'une zone résidentielle et d'une station d'épuration des eaux usées, et à 1,5 km de la ville la plus proche (voir le tableau 7 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 7.
Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Finlande)

Informations clefs	Description
Scénarios d'incidents majeurs	Rejet de gaz inflammable/liquide inflammable ; rejet de gaz et de liquide GPL d'un camion-citerne ou d'un wagon de train.
Examen des conséquences des rejets	Aucun décès ni aucune blessure à l'extérieur de l'installation n'est à craindre. Aucun dommage hors site ni aucun effet sur les zones résidentielles adjacentes n'est considéré comme une conséquence possible. Les seules conséquences environnementales seraient un incendie de végétation à proximité de l'installation. La modélisation des conséquences a été réalisée à l'aide du logiciel Phast et les niveaux de rayonnement thermique ont été évalués à 3-8 kW/m ² .
Probabilité d'occurrence	Non évaluée ; les causes de l'incident pouvaient être une défaillance structurelle, un accident de la circulation ou une erreur humaine.
Présentation des risques	Risques individuels et environnementaux. Évaluation qualitative des risques réalisée au moyen d'un diagramme « nœud papillon ». Évaluation des risques réalisée également grâce à des méthodes quantitatives telles que la modélisation des conséquences. Matrice de risque non communiquée.
Critères d'acceptabilité des risques	Non précisé
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Détecteurs de gaz et d'incendie ; systèmes instrumentés de sécurité (contrôle du niveau, soupapes de sécurité, etc.). Mesures de prévention : ATmosphère EXplosible, mise à la terre, entretien régulier et surveillance vidéo. Mesures de protection : système de refroidissement à l'eau, système d'extinction à l'eau, plans d'urgence internes et externes et activités de formation.

2. France

Le site, d'une superficie d'environ 65 000 m², est entouré d'un canal, de routes, d'usines et de voies ferrées (voir le tableau 8 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 8.

Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (France)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Explosion et incendie dus à la libération de gaz/liquide inflammable.
Examen des conséquences des rejets	Estimation des conséquences : de 100 à 1 000 blessés. Risque d'exposition des personnes vivant à proximité de l'installation à des surpressions et au rayonnement thermique. Utilisation de valeurs de danger immédiat pour la vie ou la santé (danger d'inhalation) aux fins de l'évaluation des conséquences et du logiciel Phast pour la modélisation des conséquences.
Probabilité d'occurrence	Le scénario le plus défavorable est jugé « extrêmement improbable ». Les causes d'incidents comprennent les défaillances des équipements, les erreurs humaines et le desserrement de raccords en raison de l'usure. Données du RIVM utilisées pour déterminer la probabilité d'un incident.
Présentation des risques	Risque pour les personnes et l'environnement. Évaluation quantitative des risques réalisée au moyen d'un diagramme « nœud papillon ». La matrice de risque comportait quatre niveaux de gravité qualitative : modéré (aucune blessure ou décès) ; grave (blessure ou maladie mineure) ; important (hospitalisation due à une exposition/incapacité permanente) ; catastrophique (décès). Les niveaux de probabilité qualitative utilisés étaient les suivants : extrêmement improbable ; très peu probable ; improbable ; fréquent.
Critères d'acceptabilité des risques	Critères d'acceptabilité des risques basés sur les critères nationaux (circulaire du 10 mai 2010) et une combinaison de niveaux qualitatifs et quantitatifs. Les risques individuels et environnementaux ont été évalués à l'aide de différentes méthodes. Les incidences environnementales ont été examinées selon une approche qualitative au cas par cas. Parties prenantes participant à l'élaboration de la matrice de risque et des critères d'acceptabilité des risques : direction de l'installation ; spécialistes de la sécurité ; autorités locales compétentes.
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Détecteurs de gaz et de flammes ; systèmes instrumentés de sécurité (contrôle du niveau et de la pression). Mesures de prévention : entretien, soupapes de sécurité et activités de formation. Mesures de protection : systèmes d'extinction d'incendie, système de pulvérisation d'eau pour le refroidissement et plan d'intervention d'urgence.

Abréviation : RIVM = National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands (Institut néerlandais de protection de la santé publique et de l'environnement).

3. Suède

Le site, d'une superficie de 20 000 m², consiste en une installation de stockage souterrain de GPL, située à proximité d'une zone résidentielle et d'un port. Le GPL est stocké dans une citerne pressurisée de 47 000 m³ et dans une citerne réfrigérée de 100 000 m³ (voir le tableau 9 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 9.

Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Suède)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Rejet de gaz toxique entraînant un incendie et une explosion.
Examen des conséquences des rejets	Jusqu'à 50 morts possibles. L'une des conséquences environnementales serait le rejet de GPL dans l'atmosphère. Aucun dommage hors site attendu. Modélisation des conséquences à l'aide de l'outil ALOHA.
Probabilité d'occurrence	La cause identifiée de l'incident était une fuite (rupture de tuyau/bride/valve). La probabilité d'une fuite de tuyauterie était de $3,8 \times 10^{-7}$ /an. La probabilité d'occurrence d'un incident a été évaluée à l'aide d'avis d'experts, d'une analyse par arbre d'événements et de bases de données telles que la <i>Classification of Hazardous Locations</i> (classification des zones dangereuses) ⁶⁵ .
Présentation des risques	<p>Les risques identifiés étaient les suivants : fuite (tuyau/bride/valve), incendie, vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition (BLEVE). Les risques individuels et sociétaux ont été examinés.</p> <p>Une évaluation semi-quantitative, fondée sur une analyse des dangers principaux, a d'abord été menée pour établir les scénarios. Les risques ont été calculés selon la méthode « probabilité x conséquence ». Une analyse quantitative, fondée sur une analyse par arbre d'événements, a ensuite été effectuée afin de dimensionner les scénarios.</p> <p>La matrice de risque comprenait les niveaux de risque suivants : faible (vert) ; moyen (jaune) ; élevé (rouge).</p> <p>Les niveaux de probabilité étaient les suivants : < une fois/1 000 ans ; < une fois/100-1 000 ans ; < une fois/10-100 ans ; < une fois/1-10 ans ; < une fois par an.</p> <p>Les niveaux de gravité étaient les suivants : blessures mineures (pas d'hospitalisation nécessaire) ; blessures importantes (hospitalisation nécessaire) ; blessures graves (dommages permanents) ; élevé (décès : 1) ; catastrophe (décès : >10).</p>
Critères d'acceptabilité des risques	<p>Il n'existe pas de critères nationaux d'acceptabilité des risques en Suède. Les exploitants appliquent des critères de risque élaborés par d'autres pays et organisations industrielles. En application de la législation environnementale suédoise, ils doivent prouver aux autorités et à la population qu'ils peuvent gérer les risques et les maintenir à un niveau bas.</p> <p>Les exploitants sont tenus de prendre toutes les mesures nécessaires pour prévenir les accidents à un coût raisonnable. Il appartient donc aux autorités et aux tribunaux de déterminer le coût raisonnable par rapport au risque dans chaque cas.</p> <p>Un risque individuel de 10^{-7} est représenté sur une carte (voir fig. 11). Parties prenantes : consultants en sécurité ; personnel d'exploitation de l'entreprise.</p>

⁶⁵ A. W. Cox, F. P. Lees et M. L. Ang (Warwickshire, Institution of Chemical Engineers, 1990).

Informations clefs	Description
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Détecteurs de gaz et systèmes d'alarme ; mesures de prévention (procédures et instructions, notamment) ; mesures de protection (systèmes d'arrêt d'urgence, notamment) ; plans d'intervention d'urgence en cas de rejet de gaz.

Abréviations : ALOHA = Areal Locations of Hazardous Atmospheres (Localisation en surface des atmosphères dangereuses).

* A. W. Cox, F. P. Lees et M. L. Ang (Warwickshire, Institution of Chemical Engineers, 1990).

Figure 11.

Représentation cartographique des risques individuels dans le cas d'une installation de gaz de pétrole liquéfié en Suède



Source : Rapport de sécurité de la Suède, 14 février 2021, référence MSB 2021-05861 (image publiée avec l'autorisation de l'Agence suédoise pour la protection civile).

4. Suisse

Le site, d'une superficie d'environ 30 000 m², comprend une zone d'installation de 1 000 m², où se trouvent deux réservoirs de GPL utilisés pour chauffer les aiguillages des lignes ferroviaires en hiver afin d'éviter le gel. Ces réservoirs sont proches d'une zone résidentielle, d'une ligne de chemin de fer, d'une zone industrielle et d'un hôpital (voir le tableau 10 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 10.

Résumé de l'étude de cas concernant le gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié (Suisse)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Explosion de nuages de vapeur et vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition (BLEVE) en raison d'un rejet de gaz/liquide inflammable.
Examen des conséquences des rejets	Les conséquences d'un rejet comprennent l'exposition au rayonnement thermique. La survenue d'effets transfrontières n'a pas été jugée plausible dans le scénario d'incident. Selon l'analyse des risques, l'explosion de nuages de vapeur et la BLEVE entraîneraient, respectivement, 430 et 280 décès. Aucun effet sur l'environnement n'a été relevé dans l'analyse des risques, les produits de la combustion du GPL n'étant pas écotoxiques. Modélisation des conséquences réalisée à l'aide du logiciel EFFECTS. Fonctions Probit utilisées pour le rayonnement thermique dans EFFECTS. Différents rayons ont été définis pour chaque taux de létalité (160 m pour un taux de létalité de 100 % (cercle vert), 310 m pour un taux de létalité de 50 % (cercle bleu) et 450 m pour un taux de létalité de 1 % (cercle rouge)) (voir fig. 12 et 13).
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : crash d'un petit avion ; impact mécanique d'un véhicule routier. La probabilité a été déterminée grâce à une analyse par arbre de défaillances et par arbre d'événements. L'analyse des risques auxquels sont exposés les réservoirs de stockage de GPL a été menée conformément à une directive suisse interne. La probabilité d'une explosion de nuages de vapeur était de 10^{-11} et celle d'une BLEVE de 10^{-8} .
Présentation des risques	Le principal danger évalué concernait le rayonnement thermique. Le risque a été considéré en tant que risque sociétal. L'évaluation des risques réalisée était quantitative et reposait sur les méthodes de l'arbre de défaillances et de l'arbre d'événements. La matrice de risque se composait de trois niveaux de risque différents, d'acceptable à inacceptable (voir fig. 14).
Critères d'acceptabilité des risques	Critères d'acceptabilité des risques fondés sur les lignes directrices relatives aux installations chimiques du manuel de l'ordonnance sur les accidents majeurs ⁶⁶ . Ces lignes directrices, acceptées par toutes les parties prenantes, sont harmonisées à l'échelle de la Suisse. Critères d'acceptabilité des risques (voir fig. 15) résumés à l'aide de la courbe de somme des risques pour les réservoirs de gaz GPL. Parties prenantes : autorités fédérales et cantonales ; représentants de différentes associations industrielles.
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	La conclusion de l'analyse était que le risque était inacceptable. Les deux réservoirs de GPL ont donc été démontés et le chauffage a été assuré par de petites conduites souterraines présentant un potentiel de risque beaucoup plus faible.

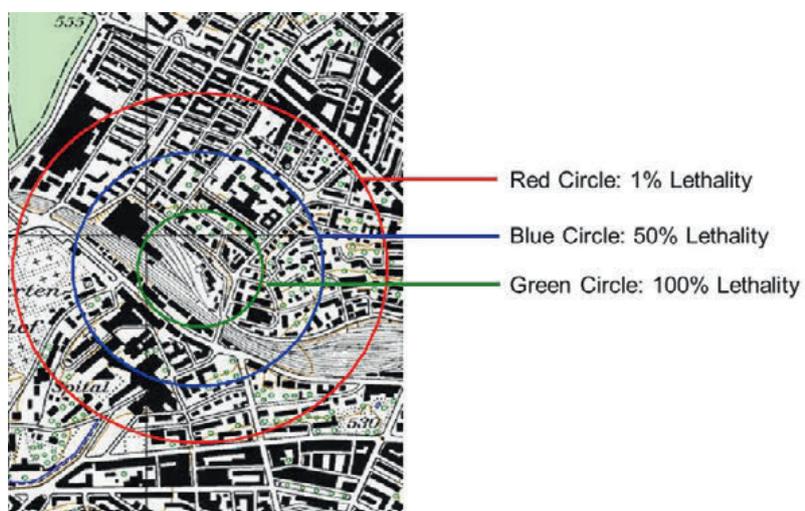
⁶⁶ <http://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/beurteilungskriterien-zur-stoerfallverordnung-stfv.html>.

Figure 12.
Réservoir de gaz de pétrole liquéfié (Suisse)



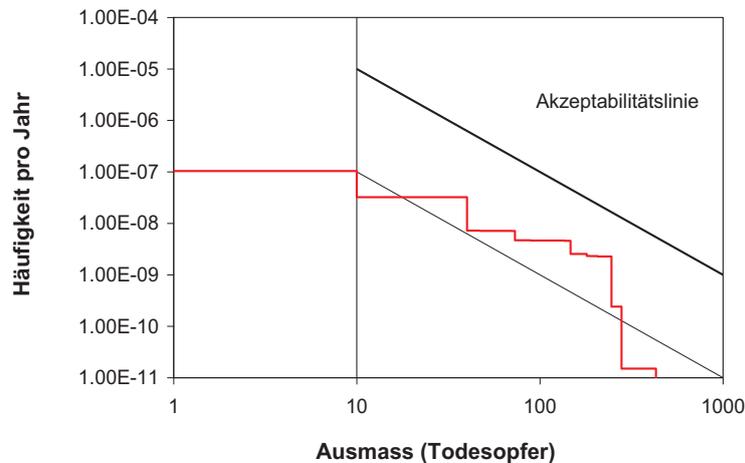
Source : M. Merkofer, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2010.

Figure 13.
Contours de risque - gaz de pétrole liquéfié (Suisse)



Source : M. Merkofer, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2010.

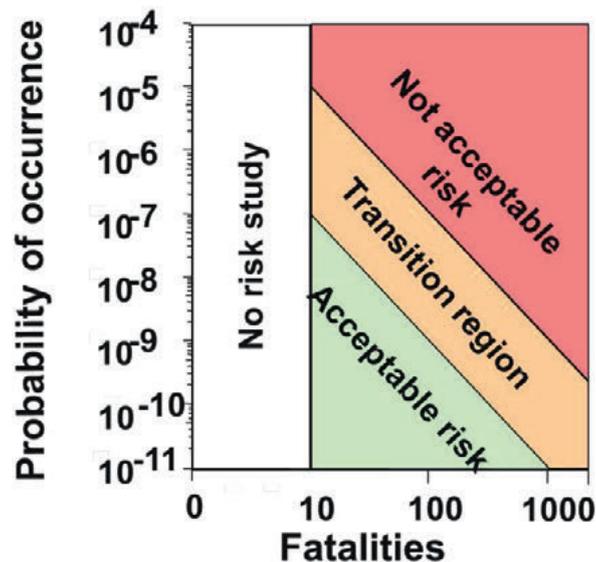
Figure 14.
Présentation des risques liés au gaz de pétrole liquéfié (Suisse)



Source : M. Merkofer, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2010.

Note : Häufigkeit pro Jahr = « fréquence par an » ; Ausmass (Todesopfer) = « ampleur » (décès) ; Akzeptabilitätslinie = « ligne d'acceptabilité ».

Figure 15.
Critères d'acceptabilité des risques liés aux gaz de pétrole liquéfiés (Suisse)



Source : M. Merkofer et al., Critères d'évaluation, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2018 (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/beurteilungskriterien-zur-stoerfallverordnung-stfv.html>).

Note : Niveau blanc et vert : « risque acceptable » ; niveau orange : « zone de transition » (risque acceptable après pondération des intérêts) ; niveau rouge : « risque non acceptable ».

B. Réfrigération à l'ammoniac

1. Estonie

Le site, d'une superficie d'environ 60 500 m², se trouve dans un port à proximité de zones résidentielles et maritimes (voir le tableau 11 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 11.

Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Estonie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Dégagement de gaz d'ammoniac entraînant un nuage toxique et provoquant un incendie et une BLEVE.
Examen des conséquences des rejets	Les conséquences du scénario le plus défavorable pourraient mettre en danger 2 945 personnes, dont 30 % seraient directement menacées. Les zones résidentielles et portuaires environnantes devraient être évacuées en raison du rejet de substances toxiques. Trois niveaux de conséquences sont utilisés : danger immédiat pour la vie ou la santé ; AEGL-3 (30 min) ; concentration létale (LC ₅₀ à 30 minutes). L'outil ALOHA a été utilisé pour modéliser les conséquences.
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : erreur humaine ; problème technologique ; orage. Le Purple Book ⁶⁷ du RIVM et l'analyse des problèmes potentiels sont les bases de données et les références utilisées pour déterminer la probabilité d'un incident. La probabilité est inférieure à une fois tous les cinquante ans.
Présentation des risques	Les différents types de risques comprenaient les risques individuels et sociétaux (personnes, entourage, environnement) et les pertes matérielles. Des méthodes semi-quantitatives ont été utilisées pour évaluer les risques. Les méthodes qualitatives utilisées pour l'évaluation des risques étaient l'analyse des problèmes potentiels, les méthodes du RIVM et les lignes directrices du Purple Book pour l'évaluation quantitative des risques. Des méthodes quantitatives ont été utilisées pour modéliser les conséquences. Une matrice de risque a été utilisée pour évaluer les risques. Les niveaux de gravité de la matrice de risque étaient les suivants : négligeable ; mineur ; modéré ; majeur ; catastrophique. Les niveaux de probabilité de la matrice de risque étaient les suivants : très faible ; faible ; moyen ; important ; très important.
Critères d'acceptabilité des risques	Non disponible
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Mesures de réduction des risques : alarmes de détection de concentration toxique, alarmes de fuite et de niveau, systèmes d'alarme sur site et hors site ; systèmes instrumentés de sécurité, y compris le contrôle du niveau. Mesures de prévention : clôtures, différentes alarmes, entretien et exercices pratiques. Mesures de protection : équipements de protection individuelle, rideaux d'eau visant à limiter les fuites de gaz et extincteurs. Plans d'intervention d'urgence externes et internes.

Abréviation : AEGL = guide de seuils d'exposition aiguë.

2. Finlande

Le site, d'une superficie d'environ 1 300 000 m², se trouve à 2,7 km de la ville la plus proche et à 1,7 km de la résidence la plus proche (voir le tableau 12 pour le résumé de l'étude de cas).

⁶⁷ P. A. M. Uijt de Haag et B. J. M. Ale, CPR 18E – Guidelines for quantitative risk assessment: « Purple Book » – Part one: Establishments (s. d., Committee for the Prevention of Disasters (CPR), 1999) (<https://publicatiereeksgevaarlijkkestoffen.nl/publicaties/PGS3.html>).

Tableau 12.

Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Finlande)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Fuite d'ammoniac toxique d'un wagon de train provenant d'un réservoir pressurisé ou non pressurisé.
Examen des conséquences des rejets	<p>Le nombre de décès ou de blessures n'a pas été évalué. Le scénario le plus défavorable prévoyait une fuite d'un réservoir de 5 000 tonnes entraînant des concentrations AEGL-3 dans les bâtiments les plus proches.</p> <p>Les incidences environnementales comprenaient des dommages aux arbres et aux plantes.</p> <p>Une exposition à des gaz toxiques avec des effets notables pourrait avoir lieu en cas de direction défavorable du vent. Des évacuations pourraient être nécessaires. Les seuils AEGL-2 et AEGL-3 (10 minutes, 30 minutes et 60 minutes) ont été retenus pour évaluer les conséquences. Le logiciel EFFECTS a été utilisé pour modéliser les conséquences.</p>
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : défaillance structurelle. Les autres éléments n'ont pas été évalués ou signalés.
Présentation des risques	<p>Les différents types de risques évalués sont les risques pour les personnes, l'environnement, les biens et la réputation. Une évaluation qualitative (analyse des dangers et de l'exploitabilité (HazOp)) et semi-quantitative (identification des dangers (HazId)) des risques a été réalisée. Une matrice de risque a été utilisée.</p> <p>Les niveaux de gravité utilisés dans la matrice de risque étaient les suivants : négligeable ; mineur ; modéré ; majeur ; grave.</p> <p>Les niveaux de probabilité utilisés dans la matrice de risque étaient les suivants : extrêmement improbable ; très improbable ; peu probable ; probable ; très probable.</p>
Critères d'acceptabilité des risques	Non disponible
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Détecteurs de gaz et alarmes ; systèmes instrumentés de sécurité (contrôle du niveau et de la température, automatismes de sécurité et contrôle à distance des vannes). Mesures de prévention : consignes à l'intention des opérateurs, planification du tracé des pipelines et planification du trafic. Mesures de protection : masques d'évacuation, systèmes d'extinction à eau, générateur de secours pour le stockage de l'ammoniac, pompe d'extinction à eau au diesel et rideau d'eau. Plans d'urgence internes et externes.

3. Hongrie

Le site, d'une superficie d'environ 85 000 m², est une usine de produits alimentaires. Il est situé à moins de 100 m de zones résidentielles et industrielles (voir le tableau 13 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 13.

Résumé de l'étude de cas sur la réfrigération à l'ammoniac (Hongrie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Rejets d'ammoniac liquéfié en raison d'une surpression d'un pipeline. Aucun effet transfrontière n'a été jugé plausible.
Examen des conséquences des rejets	<p>Le scénario le plus défavorable étudié portait sur le rejet de gaz toxiques. Le scénario utilisé pour l'évaluation des risques était le suivant : rupture d'une canalisation d'ammoniac de 30 m de long et de 150 mm de diamètre interne. L'emplacement de la fuite se trouvait à 12 m de hauteur. La rupture a libéré 4 400 kg d'ammoniac liquéfié (surpression de 12,5 bars). L'analyse des risques quantitative détaillée tenait compte de toutes les circonstances météorologiques possibles. Pour l'examen des conséquences, les paramètres suivants ont été retenus : vitesse du vent de 1 m/s et classe de stabilité F-Pasquill (conditions très stables).</p> <p>Décès : taux de létalité de 10 % : 1 personne ; taux de létalité de 1 % : 4 personnes. Incidences environnementales : rejet de gaz toxiques dans l'atmosphère.</p> <p>Les zones résidentielles environnantes devraient être évacuées en raison du rejet de substances toxiques. Méthode de calcul Probit utilisée pour définir la probabilité de létalité.</p> <p>Le Green Book⁶⁸ a été utilisé comme référence pour la modélisation des conséquences. Le logiciel Safeti a été utilisé pour modéliser les conséquences (voir fig. 16 et 17).</p>
Probabilité d'occurrence	<p>Événements déclencheurs : défaillances structurelles ; défaillances des contrôles des procédés ; problèmes technologiques ; propagation depuis d'autres installations (effet domino).</p> <p>Le manuel de référence Bevi Risk Assessments⁶⁹ et le Purple Book ont été utilisés pour déterminer la probabilité d'un incident. La fréquence de rupture d'un pipeline retenue était de 10^{-7}/mètre/an.</p>
Présentation des risques	<p>L'évaluation complète des risques auxquels était exposée l'installation tenait compte de tous les scénarios possibles, y compris la défaillance du confinement de différents conteneurs, pipelines et cuves de traitement.</p> <p>Tous les scénarios susceptibles de contribuer de manière significative au risque individuel en un point donné ou au risque sociétal et qui remplissent les deux conditions suivantes ont été inclus dans l'analyse quantitative des risques : fréquence du scénario $\geq 10^{-9}$/an ; risque de blessure mortelle (taux de létalité 1 %) en dehors des limites du site.</p> <p>Il n'a pas été établi de matrice de risque. La présentation des risques comprenait les éléments suivants : matrice météorologique (vitesse du vent, direction du vent, stabilité) ; rapport de classement des risques ; risque individuel et sociétal (voir fig. 18 et 19).</p>
Critères d'acceptabilité des risques	<p>Les limites acceptables et inacceptables ont été fixées en fonction du niveau de risque et du nombre de décès (voir fig. 20).</p> <p>Des critères différents ont été utilisés pour les risques individuels et environnementaux. Les critères de risque environnemental utilisés étaient qualitatifs, les réglementations ne donnant que des orientations pratiques. Parties prenantes : exploitant ; consultants agréés.</p>

⁶⁸ C. J. H. van den Bosch et al., CPR 16E – Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials: « Green Book » (s. d., CPR, 1992).

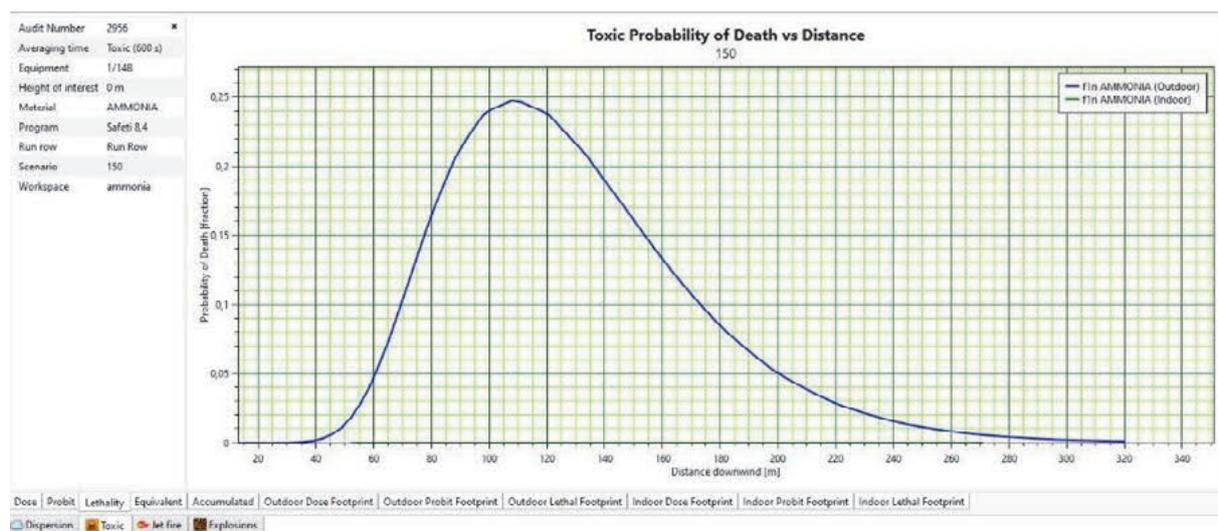
⁶⁹ http://infonorma.gencat.cat/pdf/AG_AQR_2_Bevi_V3_2_01-07-2009.pdf.

Mesures de réduction des risques mises en œuvre*

Détecteurs de gaz toxiques et systèmes d'alarme ; systèmes instrumentés de sécurité (contrôle du niveau, de la température et de la pression).
Mesures de prévention : système mobile de buses à rideau d'eau.
Supplément d'information requis aux points d'entrée sur le territoire national ; plans d'urgence internes et externes.

Figure 16.

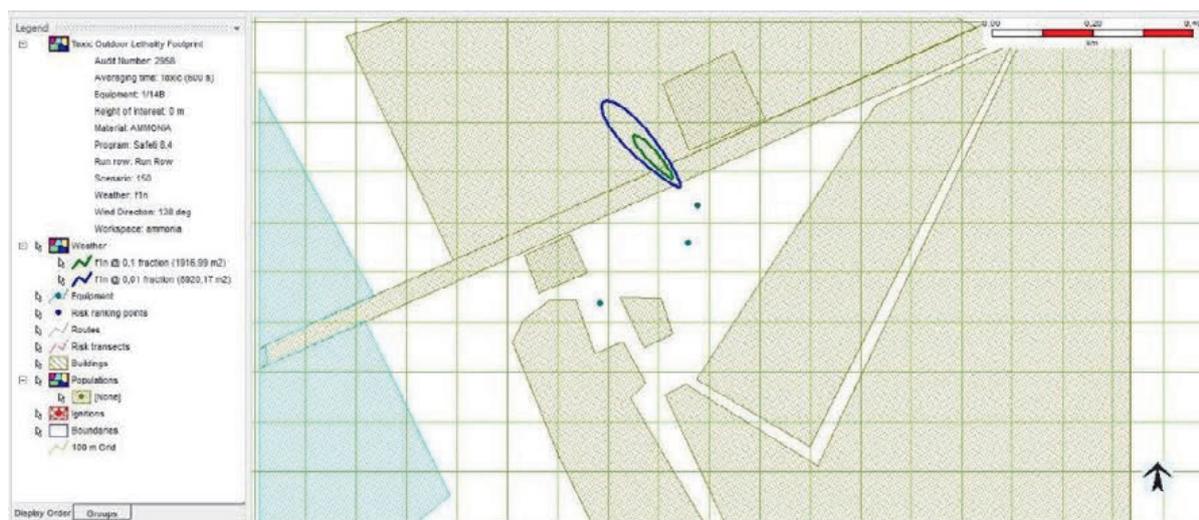
Probabilité de décès en fonction de la distance – rejet d'ammoniac (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

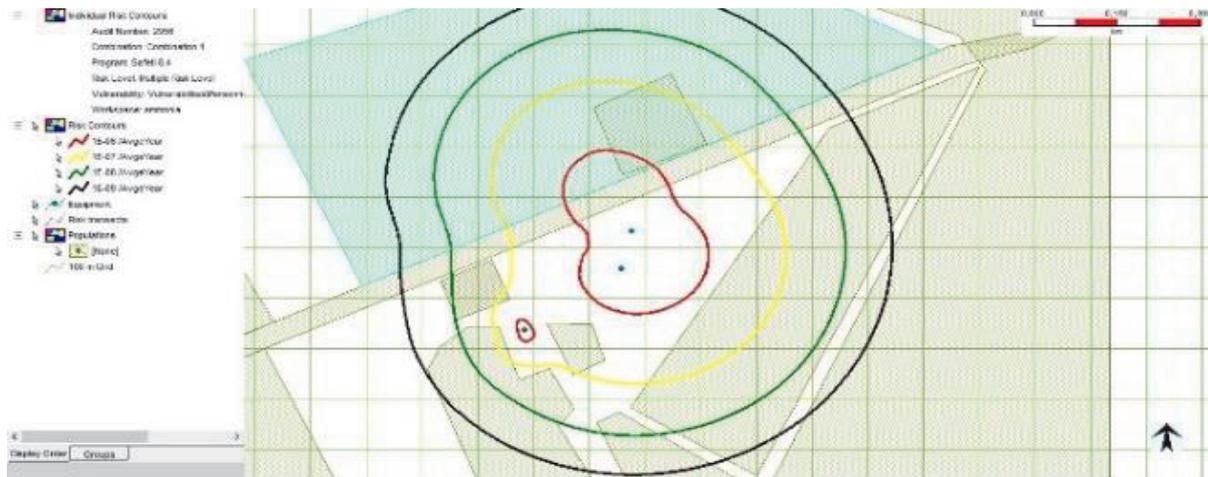
Figure 17.

Contours de probabilité de décès due à la toxicité de l'ammoniac – taux de létalité de 1 % et 10 % (Hongrie)



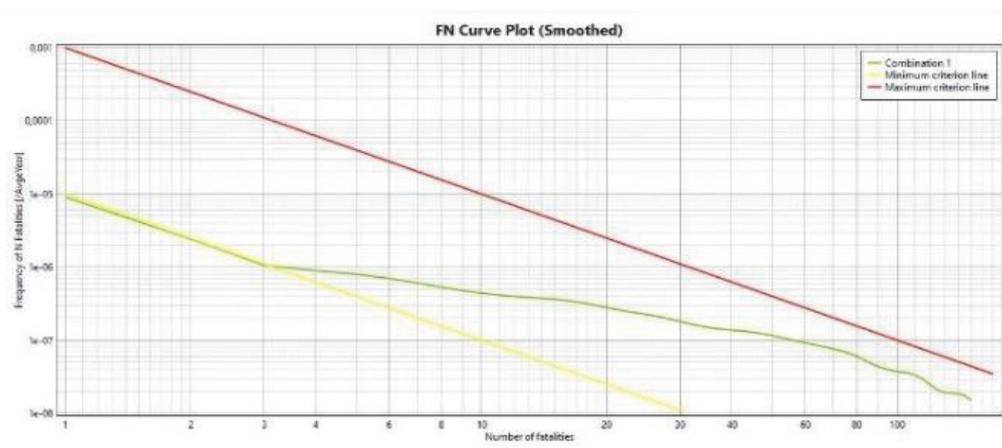
Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 18.
Contours de risque individuel – rejet d'ammoniac (Hongrie)



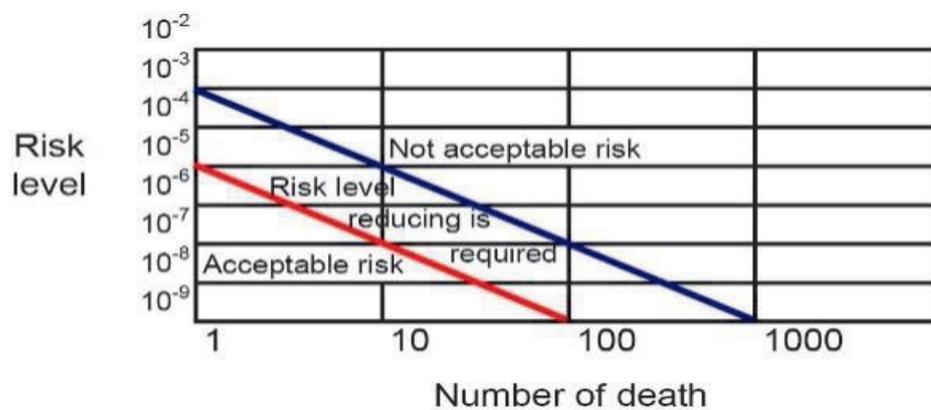
Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 19.
Courbe F/N de risque sociétal – rejet d'ammoniac (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 20.
Critères d'acceptabilité des risques liés à l'ammoniac (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

4. Suisse (contexte transfrontière)

Le site, d'une superficie d'environ 29 100 m², est situé à proximité d'une zone résidentielle, d'une école et d'une zone industrielle. Une exposition transfrontière de la France voisine a été prise en compte, la frontière étant située à 170 m de l'installation (voir le tableau 14 pour le résumé de l'étude de cas).

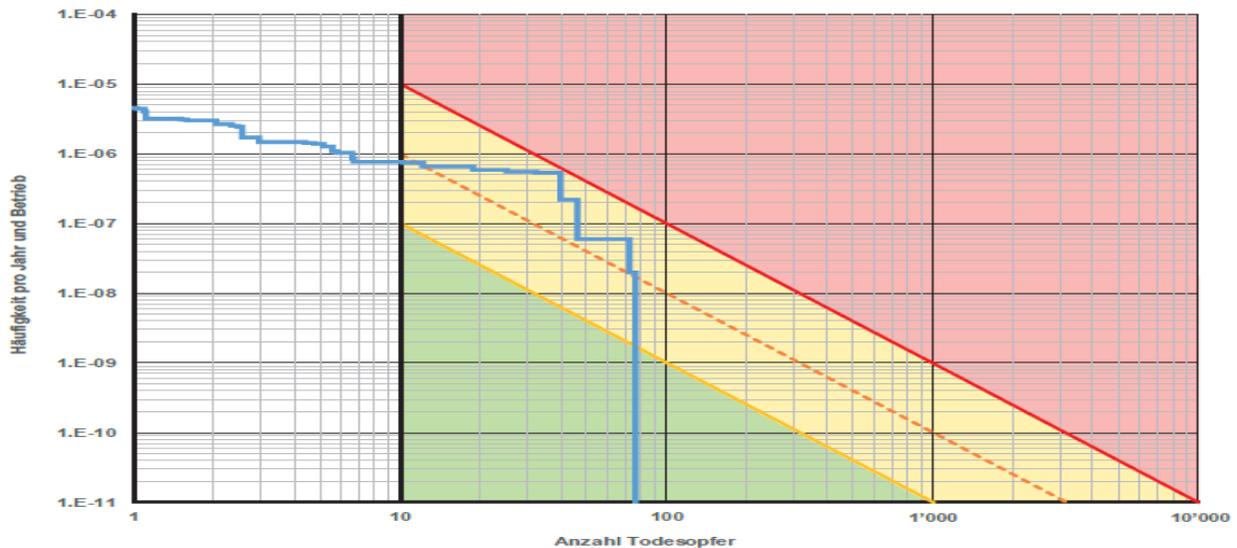
Tableau 14.

Résumé de l'étude de cas concernant la réfrigération à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Fuite d'ammoniac toxique provenant d'une installation, avec potentiels effets transfrontières en France (parking). Selon le scénario, de l'ammoniac liquide ou gazeux peut être rejeté.
Examen des conséquences des rejets	Scénario le plus défavorable : 80 décès en Suisse et en France. Le nombre de décès transfrontières n'a pas été calculé précisément. L'exposition toxique a été évaluée à l'aide de la fonction Probit de calcul de la létalité (logiciel EFFECTS).
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : tremblement de terre ; incendie ; sabotage ; action mécanique ; mauvaise manipulation ; défaillance spontanée du conteneur. Probabilités évaluées à l'aide des lignes directrices du Centre for Chemical Process Safety relatives à l'analyse quantitative des risques posés par les procédés chimiques et d'autres documents.
Présentation des risques	Le risque sociétal a été évalué quantitativement à l'aide d'une analyse par arbre de défaillances et d'une analyse par arbre d'événements. Une matrice de risque a été établie : les couleurs grise et verte représentaient un risque acceptable, la couleur jaune indiquait qu'une évaluation était nécessaire après pondération des intérêts et la couleur rouge représentait un risque inacceptable. Parties prenantes concernées : autorités fédérales et cantonales ; représentants de différentes associations industrielles (voir fig. 21).
Critères d'acceptabilité des risques	Voir fig. 22
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Détecteurs d'ammoniac, vannes à action rapide, alarmes directes transmises aux pompiers ; systèmes instrumentés de sécurité (contrôle de la température et de la pression) ; plans d'urgence internes.
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	Mesures de prévention : échangeur de chaleur pour le refroidissement secondaire (2 circuits) ; mesures de réduction du potentiel de danger (quantité d'ammoniac) ; modernisation sismique du bâtiment ; école située à environ 150 m équipée de capteurs d'ammoniac.

Figure 21.

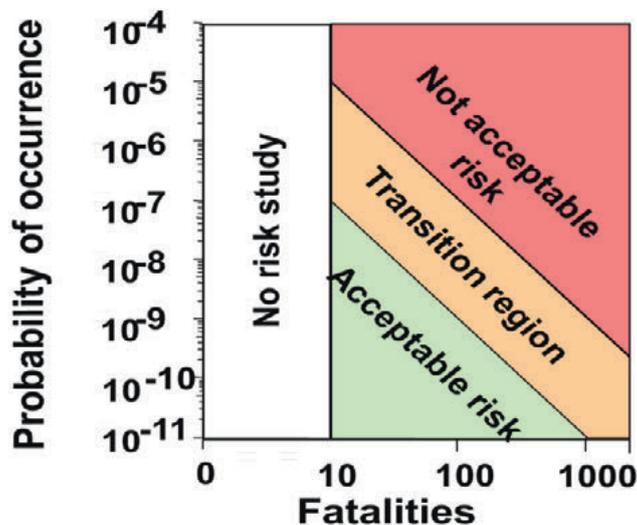
Représentation des risques liés à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière)



Source : H. Bossler, Laboratoire cantonal de Bâle-Ville, Suisse, 2021.

Figure 22.

Critères d'acceptabilité des risques liés à l'ammoniac (Suisse, contexte transfrontière)



Source : M. Merkofer et al., Critères d'évaluation, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2018 (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/beurteilungskriterien-zur-stoerfallverordnung-stfv.html>).

Note : Niveau blanc et vert : « risque acceptable » ; niveau orange : « zone de transition » (risque acceptable après pondération des intérêts) ; niveau rouge : « risque non acceptable ». En Suisse, les mêmes critères quantitatifs d'acceptabilité sont appliqués aux risques environnementaux. Un autre axe X est utilisé à la place de celui des décès.

C. Terminaux pétroliers

1. Allemagne

Le site se trouve près d'une zone résidentielle. Sa superficie et d'autres détails n'ont pas été communiqués (voir le tableau 15 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 15.

Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Allemagne)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Incendie de citerne
Examen des conséquences des rejets	Blessures corporelles. Les personnes et les bâtiments situés à proximité sont exposés à des rayonnements (1,6 kW/m ² , 5 kW/m ² et 8 kW/m ²) dus à l'incendie de la citerne. Le Yellow book ⁷⁰ a été utilisé pour modéliser les conséquences, ainsi que le logiciel DISaster MAnagement (Allemagne) et les manuels du Programme for Numerical Safety Simulations (Allemagne).
Probabilité d'occurrence	La probabilité d'incident a été évalué sur la base de l'expérience et de l'avis d'experts.
Présentation des risques	Le risque pour les personnes (risque individuel) a été identifié dans l'évaluation des risques. L'évaluation qualitative des risques a été réalisée à l'aide de la procédure de liste de contrôle allemande (Association of Technical Inspection Agencies).
Critères d'acceptabilité des risques	Les critères ont été établis à partir de niveaux qualitatifs de risque.
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Alarmes de détection d'incendie ; plans d'intervention d'urgence.

2. Norvège

Le site, d'une superficie d'environ 30 000 m² (dont 700 m² d'installations), se trouve dans une zone portuaire proche du centre-ville (zones résidentielles, zones de loisirs et autres activités portuaires), d'une route principale et d'une voie ferrée (voir le tableau 16 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 16.

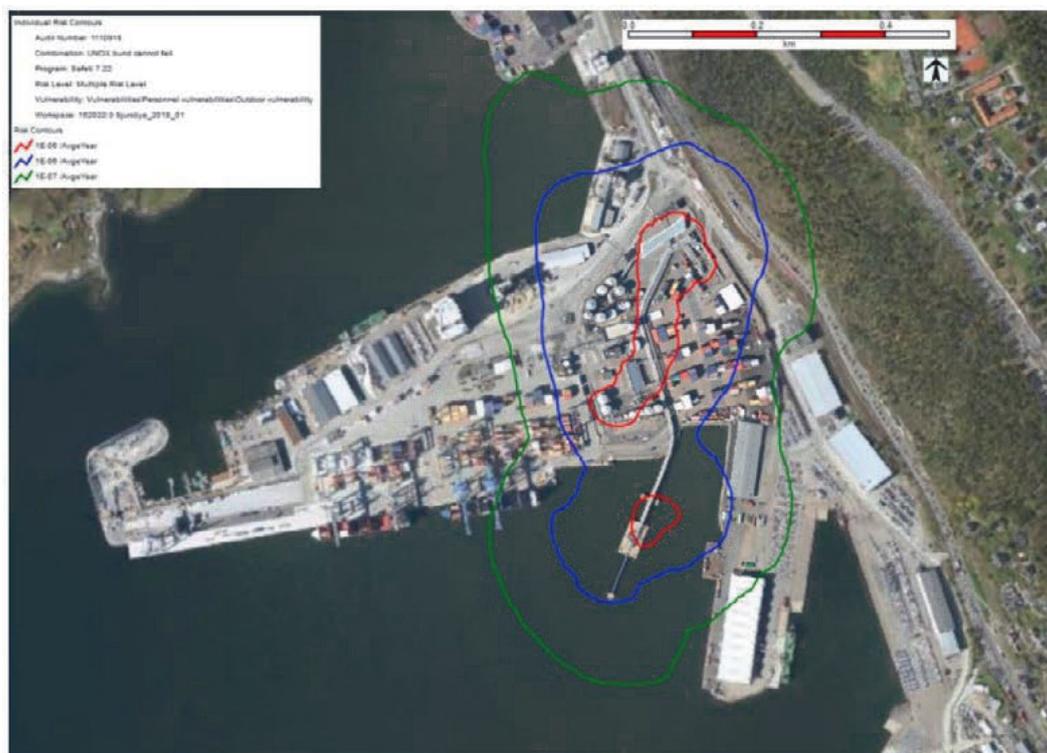
Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Norvège)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Rejet de gaz/liquide inflammable dû à une fuite de liquides pétroliers entraînant un incendie ou une explosion. L'analyse quantitative des risques a pris en compte 13 scénarios, la plupart d'entre eux entraînant une fuite de pétrole et l'inflammation du rejet, avec pour conséquence un incendie ou une explosion. La survenue d'effets transfrontières n'a pas été jugée plausible pour ce scénario.
Examen des conséquences des rejets	Les risques individuels et les risques sociétaux ont été pris en compte. Aucune population (public) en dehors de la zone portuaire ne serait touchée. L'impact environnemental n'a pas été évalué. Les outils Phast et Safeti 7.2 ont été utilisés.

⁷⁰ C. J. H. van den Bosch et R. A. P. M. Weterings, dir. publ., *CPR 14E – Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*: « Yellow Book » (s. d., CPR, 1996) (<https://publicatiereeksgevaarlijkkestoffen.nl/publicaties/PGS2.html>).

Informations clefs	Description
Probabilité d'occurrence	Sur la base des isocourbes de risques individuels, une probabilité de 10^{-5} /an a été déterminée à l'intérieur de la zone du terminal pétrolier et dans une petite fraction de la zone portuaire. Une probabilité de 10^{-6} /an a été déterminée principalement à l'intérieur de la zone portuaire et en partie au-delà du site vers la route principale et la voie ferrée. La probabilité a été déterminée à partir de données historiques issues des outils Phast et Safeti 7.2, ainsi que du manuel de référence Bevi Risk Assessments.
Présentation des risques	Le risque individuel (exposition du personnel) a été identifié dans l'évaluation des risques. Une évaluation quantitative des risques a été réalisée grâce à une analyse par arbre d'événements (voir fig. 23).
Critères d'acceptabilité des risques	Les critères d'acceptabilité des risques étaient conformes aux directives de la Direction norvégienne de la protection civile. L'évaluation des risques ne couvrait que les risques pour les personnes.
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	Mesures de réduction et de prévention des risques : détection de gaz avec arrêt d'urgence automatique ; système d'arrosage pour la mousse et l'eau sur la plateforme de chargement ; détection de liquide dans la zone des pompes avec arrêt d'urgence automatique. Le plan d'intervention d'urgence a été communiqué aux autorités locales compétentes.

Figure 23.
Contours de risque individuel – terminal pétrolier (Norvège)



Source : Tom Ivar Hansen, ingénieur principal à la Direction norvégienne de la protection civile, DSB.

3. Serbie (contexte transfrontière)

Le site, d'une superficie d'environ 710 000 m² (dont 10 000 m² d'installations), se trouve à proximité de zones industrielles et résidentielles et d'une rivière. Une exposition transfrontière en Roumanie a été envisagée (voir le tableau 11 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 17.

Résumé de l'étude de cas sur les terminaux pétroliers (Serbie, contexte transfrontière)

Informations clefs	Description
Scénarios d'incidents majeurs	Pollution fluviale transfrontière (Roumanie) possible, en cas d'échec des mesures de prévention et d'intervention, résultant du déversement de produits pétroliers dû à l'effondrement d'une barge (quai de chargement/déchargement).
Examen des conséquences des rejets	<p>Aucun décès ou blessure prévus. Il y aurait cependant un impact environnemental (pollution de rivières). Les nappes de pétrole perturbent les échanges d'oxygène, d'humidité et de chaleur entre l'hydrosphère et l'atmosphère et empêchent la pénétration des rayons du soleil dans l'eau.</p> <p>Les conséquences ont été déterminées à partir du modèle Fay de propagation des nappes de pétrole⁷¹. Le diamètre de la nappe de pétrole a été estimée à 265 m et la vitesse de son mouvement sur la surface de l'eau pendant le déversement à 3 km/heure. La durée attendue du rejet était de douze heures et demie. Le volume d'hydrocarbures s'évaporant était de 287 m³ et celui des hydrocarbures déposés sur la côte de 660 m³.</p> <p>Une étude de gestion conjointe des urgences transfrontières dues au déversement de substances dangereuses dans le Danube a été utilisée pour évaluer les conséquences de ce scénario.</p>
Probabilité d'occurrence	Événement déclencheur : effondrement de la barge (quai de chargement/déchargement). Les bases de données ARAMIS D1C – APPENDIX 10 – Données génériques sur les fréquences des événements critiques ont été utilisées pour déterminer la probabilité d'occurrence. La probabilité d'effondrement de la barge a été établie à $1,55 \times 10^{-5}$ /an.
Présentation des risques	<p>Le risque environnemental (rivière) a été pris en compte dans l'évaluation des risques. Une évaluation semi-quantitative des risques a été réalisée en utilisant la méthode ARAMIS et la méthode d'élaboration des rapports de sécurité et du plan de protection contre les accidents.</p> <p>Des niveaux quantitatifs de gravité ont été utilisés dans la matrice de risque (voir le tableau 18).</p> <p>Les catégories de probabilité utilisées dans la matrice de risque étaient les suivantes : faible ($<10^{-2}$/an) ; moyenne (10^{-1} à 10^{-2}/an) ; élevée (1 à 10^{-1}/an).</p>

⁷¹ J. A. Fay, « The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea » *Oil on the Sea*, D.P. Hoult, dir. publ. (New York, Springer, 1969), p. 53 à 63.

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Critères d'acceptabilité des risques	L'évaluation des risques comprend la détermination de la probabilité d'occurrence, l'évaluation des conséquences possibles et la détermination qualitative du risque (les niveaux possibles sont les suivants : négligeable, faible, moyen, élevé et très élevé). Un risque est considéré comme inacceptable s'il est « très élevé » selon la matrice de risque. Parties prenantes participant à la mise au point de la matrice de risque : direction de l'installation ; spécialistes de la sécurité.
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Intervention manuelle de l'exploitant ; respect des consignes concernant les opérations et les procédures en matière de santé, de sécurité et d'environnement. Mesures de protection : absorbeurs flottants et écumers. Plan de préparation et d'intervention d'urgence mis en place sur le site ; instructions relatives à la sécurité des opérations avec des dispersants pour la neutralisation des produits pétroliers déversés sur la surface de l'eau des surfaces manipulables. Instructions de travail avec des équipements en cas d'accident à la jonction des rivières.

Tableau 18.
Niveaux quantitatifs de gravité utilisés dans la matrice de risque

<i>Gravité</i>	<i>Animaux morts (tonnes)</i>	<i>Sols contaminés (hectares)</i>	<i>Domages matériels (dinars serbes/€)</i>
Faible	≤0,5	≤0,1	≤100 000/850
Significatif	0,5–5	0,1–1	100 000–1 million/850–8 500
Important	5–10	1–10	1 million–10 millions/8 500–85 000
Grave	10–30	10–30	10 millions–100 millions/85 000–850 000
Catastrophique	>30	>30	>100 millions/850 000

4. Slovénie

Le site, d'une superficie d'environ 250 000 m², se trouve à proximité de zones industrielles et résidentielles, d'une rivière et de la mer (voir le tableau 19 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 19.
Résumé de l'étude de cas concernant les terminaux pétroliers (Slovénie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Scénario d'incendie. Déversement de carburant d'un réservoir de stockage dans un bassin de rétention, inflammation et propagation du feu à un autre réservoir.
Examen des conséquences des rejets	Décès ou blessures dus à l'incendie. Incidences environnementales dues aux émissions atmosphériques. Exposition des personnes vivant aux alentours de l'installation à des gaz toxiques, exposition du bâtiment adjacent à une surpression et à un rayonnement du à l'incendie. Aucun effet transfrontière attendu. Les lignes directrices nationales pour l'identification des dangers et l'évaluation des risques ⁷² ont été utilisées. Le logiciel BREEZE a été utilisé pour modéliser les conséquences.

⁷² https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Industrijske-nesrece/c93c587d86/pripravljenost_na_nesrece.pdf (en slovène).

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : défaillance du réservoir ; inflammation ; défaillance des systèmes de refroidissement. La probabilité de l'incident a été estimée à $7,6 \times 10^{-14}$ /an. Le Red Book ⁷³ a été utilisé comme référence. Les probabilités de défaillance des systèmes de refroidissement et de la cuve ont été estimées respectivement à $6,9 \times 10^{-2}$ /an et à $1,1 \times 10^{-9}$ /an.
Présentation des risques	<p>Les risques individuels ont été pris en compte dans l'évaluation des risques. Une évaluation quantitative des risques a été réalisée sur la base d'une modélisation des conséquences. Les méthodes qualitatives HazOp et HazId ont été utilisées pour l'évaluation des risques.</p> <p>Les niveaux de gravité qualitatifs suivants ont été définis :</p> <p>Insignifiant : aucun blessé parmi les employés de l'installation ou à proximité, les dommages matériels sont mineurs, les dommages environnementaux sont insignifiants.</p> <p>Faible : blessés légers parmi les employés et/ou dommages à des machines et/ou arrêts de production mineurs et/ou pollution environnementale mineure.</p> <p>Grave : Décès ou blessés graves parmi les employés ou dans le voisinage immédiat et/ou destruction importante d'équipements et/ou arrêt de production majeur et/ou dommages environnementaux, mais sans conséquences durables.</p> <p>Catastrophique : plusieurs décès et/ou blessés graves parmi les employés ou les personnes se trouvant à proximité et/ou destruction complète de l'installation et/ou d'autres installations touchées et/risques encourus par la population des environs et/ou dommages environnementaux aux conséquences plus durables.</p> <p>Les niveaux de probabilité qualitatifs suivants ont été définis : insignifiant ; faible ; modéré ; élevé.</p>
Critères d'acceptabilité des risques	Les risques sont considérés comme acceptables s'ils sont évalués comme tels en appliquant les critères de la matrice de risque. Parties prenantes participant à l'élaboration de la matrice de risque : direction de l'installation ; spécialistes de la sécurité.
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Alarme incendie, détecteur de flamme infrarouge, système de vidéosurveillance, alarme visuelle et sonore ; systèmes instrumentés de sécurité (protection contre la foudre, réservoirs à double fond, raccordement de l'agent extincteur, système de retenue, protection contre la surpression avec soupapes de sécurité, digue anti-incendie et contrôle des fuites de fond). Mesures de prévention : contrôle du niveau ; jauges de température ; contrôle antidébordement. Mesures de protection : système de contrôle automatisé pour l'extinction et le refroidissement. Plans d'intervention d'urgence à des fins de protection et plans d'intervention en cas d'accident lié à des substances dangereuses.

⁷³ J. C. H. Schüller et al., *CPR 12E – Methods for determining and processing probabilities: « Red Book »* (s. d., CPR, 1997) (<https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/PGS4.html>).

D. Stockage du nitrate d'ammonium

1. Estonie

Le site, d'une superficie d'environ 85 000 m², abrite une installation portuaire de stockage de nitrate d'ammonium et d'engrais à base de nitrate d'ammonium. Il se trouve à proximité d'une zone résidentielle et de la mer (voir le tableau 20 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 20.

Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Estonie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Explosion due à la contamination de la cargaison par des corps étrangers ou des impuretés qui peuvent catalyser la réaction d'autodécomposition. L'augmentation de la température du nitrate d'ammonium entraîne un incendie et une explosion. Effets transfrontières considérés comme improbables.
Examen des conséquences des rejets	Conséquences pour les personnes : morts ou blessés dus à l'explosion et à l'incendie. Effets sur l'environnement : pollution résultant de la libération de produits de combustion et de décomposition. Le rejet des eaux d'incendie dans la mer peut entraîner une contamination de l'environnement. Il y aura des dommages à l'extérieur du site, car le port et les zones résidentielles environnantes devront être évacués en raison de l'incident. L'approche fondée sur l'équivalent TNT permet de définir trois types de zones (méthodologie du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord).
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : erreurs humaines ; problèmes techniques ; défaillance du contrôle des procédés ; facteurs externes et événements naturels (accidents Natech). La probabilité a été déterminée à l'aide de bases de données HazOp (dangers et exploitabilité) et AMDE (analyse des modes de défaillance et de leurs effets). Probabilité d'occurrence de l'incident considérée comme « très faible » (probabilité annuelle comprise entre 0,005 % et 0,05 %)
Présentation des risques	Risques pris en compte : risques individuels et sociétaux (personnes, voisinage, environnement) et pertes matérielles. Une évaluation semi-quantitative des risques a été menée en utilisant les méthodes HazOp et AMDE. L'évaluation des risques a fait appel à la modélisation des conséquences. Le risque a été déterminé à l'aide d'une matrice de risque. Les niveaux de gravité qualitative utilisés étaient les suivants : négligeable ; mineur ; modéré ; majeur ; catastrophique. Les niveaux de probabilité qualitative utilisés étaient les suivants : très peu probable ; peu probable ; possible ; probable ; très probable.
Critères d'acceptabilité des risques	Non disponible
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	Système d'alarme sur site et hors site. Mesures de prévention : clôtures, respect des prescriptions de sécurité incendie, système de vidéosurveillance, système de régulation de la température, ventilation de l'entrepôt, diverses alarmes, entretien et exercices d'entraînement. Mesures de protection : équipements de protection individuelle, entrepôt équipé de dispositifs d'évacuation des fumées et de la chaleur, extincteurs et alarme incendie. Plans d'intervention d'urgence interne et externe en cas d'incident.

2. Lettonie

Le site, qui abrite une installation de stockage de nitrate d'ammonium et d'engrais à base de nitrate d'ammonium, se trouve à proximité d'une voie ferrée et d'une zone industrielle. La superficie du site n'a pas été précisée (voir le tableau 21 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 21.

Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Lettonie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Feu d'engin de chargement ou de camion avec dégagement d'ammoniac (gaz toxique). Effets transfrontières considérés comme impossibles.
Examen des conséquences des rejets	Conséquences pour les personnes : morts ou blessés dus à l'incident. Les effets toxiques des oxydes d'azote ont été étudiés en évaluant les concentrations à des hauteurs de 1,5 m (personnes se trouvant à l'extérieur) et de 5 m (ouvertures du bâtiment). Conséquences : dommages à l'extérieur du site, maladies respiratoires résultant de l'exposition, décès et autres blessures. Les conséquences ont été évaluées pour une distance correspondant à un taux de létalité de 1 %. Conséquences modélisées à l'aide du Purple Book.
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : erreur humaine ; défaillance du contrôle des procédés. Probabilité d'occurrence de l'incident déterminée à l'aide du Red Book.
Présentation des risques	Risques pris en compte : risques individuels et sociétaux. Une évaluation qualitative des risques a été menée à l'aide de la méthode AMDE. Des méthodes d'évaluation quantitative des risques ont également été prises en compte et utilisées.
Critères d'acceptabilité des risques	Critère d'acceptabilité retenu pour le risque individuel : 10^{-6} , conformément aux recommandations des Pays-Bas.
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	Mesure de prévention : limitation de la quantité de nitrate d'ammonium par tas. Plan d'intervention d'urgence en cas d'incident.

3. Pays-Bas

Le site, dont la superficie est inconnue, abrite une installation de production d'engrais à base de nitrate d'ammonium et de stockage d'ammoniac. Les informations concernant l'exposition du voisinage n'ont pas été fournies. Le scénario étudié est très proche de ceux portant sur la réfrigération à l'ammoniac, car la substance et les conséquences sont identiques (voir le tableau 22 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 22.

Résumé de l'étude de cas concernant le stockage du nitrate d'ammonium (Pays-Bas)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Rejets d'ammoniac (rupture de réservoir, rupture de tuyauterie). Effets transfrontières considérés comme improbables.
Examen des conséquences des rejets	<p>Conséquences pour les personnes : risque de décès des personnes se trouvant à l'extérieur des locaux de l'installation. Le nombre de décès attendus a été calculé à l'aide de modèles intégraux d'évaluation des risques.</p> <p>Effets sur l'environnement étudiés : impacts des rejets. Probabilité de décès et nombre de décès calculés à l'aide des fonctions Probit pour les substances toxiques. Zone de danger pour le public déterminée en utilisant des niveaux d'intervention (comparables aux seuils AEGL).</p> <p>Conséquences modélisées à l'aide du Purple Book. Accès aux nouvelles fonctions Probit pour les substances toxiques et aux niveaux d'intervention en cas d'exposition à des substances toxiques par l'intermédiaire du site Web du RIVM. Conséquences modélisées à l'aide des logiciels Phast et Safeti.</p>
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : erreur humaine ; défaillance du contrôle des procédés ; dégradation des matériaux (corrosion). Probabilité d'occurrence de l'incident déterminée à l'aide du Red Book et du Purple Book.
Présentation des risques	<p>Probabilité d'occurrence de l'incident déterminée à l'aide du Purple Book.</p> <p>Probabilité d'une défaillance catastrophique d'un récipient sous pression contenant de l'ammoniac : $10^{-6}/\text{an}$.</p> <p>Risques étudiés : exposition à l'ammoniac (gaz toxique). Risques pris en compte pour les calculs : risques individuels et sociétaux. Détermination de la zone de danger pour le public (exposition à des concentrations à l'intérieur des bâtiments supérieures au seuil potentiellement léthal). L'évaluation quantitative des risques a été réalisée en utilisant un ensemble normalisé de scénarios et de fréquences, associé à la modélisation des conséquences.</p> <p>La matrice de risque n'a pas été utilisée. Risque synthétisé en tenant compte du risque individuel et du risque sociétal (courbe F/N).</p>
Critères d'acceptabilité des risques	<p>Critères d'acceptabilité des risques fixés par la réglementation : probabilité inférieure à $10^{-6}/\text{an}$ à l'emplacement des maisons pour le risque individuel ; probabilité égale à $10^{-3}.N^{-2}/\text{an}$ pour le risque sociétal. Pour la courbe du risque sociétal, voir le Purple Book.</p> <p>Les critères concernent uniquement les risques pour les personnes, pas les risques environnementaux.</p> <p>Les critères d'acceptabilité des risques reposent sur les dispositions législatives nationales.</p>
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	L'évaluation des risques a été utilisée à des fins d'aménagement du territoire à l'extérieur du site, et non pour déterminer les mesures de réduction des risques. L'entreprise doit mettre en œuvre des mesures fondées sur la matrice de risque et approuvées par les autorités compétentes.

E. Chlore

1. France

Le site, d'une superficie d'environ 560 000 m², se trouve à proximité d'une voie ferrée, d'une autoroute et de deux usines (voir le tableau 23 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 23.

Résumé de l'étude de cas concernant le chlore (France)

Informations clefs	Description
Scénarios d'incidents majeurs	Rejets de chlore (gaz toxique). Effets transfrontières considérés comme improbables.
Examen des conséquences des rejets	<p>Le scénario le plus défavorable, considéré comme « extrêmement improbable », envisageait deux morts et 94 blessés. Les rejets de gaz toxique dans l'atmosphère auraient des effets sur l'environnement.</p> <p>Des valeurs seuils nationales similaires aux seuils de danger immédiat pour la vie ou la santé ont été utilisées. La modélisation des conséquences (dispersion des gaz) a été réalisée à l'aide des logiciels ALOHA, Phast et FLame ACceleration Simulator (FLACS), en utilisant la base de données nationale publiée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).</p>
Probabilité d'occurrence	<p>Événement déclencheur : défaillance de l'équipement. La probabilité de défaillance des mesures de maîtrise des risques a été déterminée à l'aide des bases de données propriétaires d'Arkema (DOROTE), de Safecalc et d'EXE (calcul pour des taux de défaillance comprise entre 10⁻² et 10⁻³/an).</p> <p>Probabilité d'occurrence d'une perte de confinement comprise entre 5 secondes et 60 minutes : de 8,5 x 10⁻⁶ à 8,6 x 10⁻⁸/an, respectivement. Probabilité d'une rupture de conduite d'une durée de 60 minutes : 5,3 x 10⁻⁵/an.</p>
Présentation des risques	<p>Risque individuel dû à l'exposition au chlore gazeux. Évaluation qualitative des risques à l'aide d'un diagramme « nœud papillon ». Évaluation des risques à l'aide d'une matrice de risque.</p> <p>Les niveaux de gravité qualitative utilisés étaient les suivants :</p> <p>Modéré : aucune blessure ou décès ; Grave : blessure ou maladie mineure ; Important : hospitalisation ou incapacité permanente due à l'exposition ; Catastrophique ou désastreux : décès.</p> <p>Les niveaux de probabilité qualitative utilisés étaient les suivants : extrêmement improbable ; très improbable ; improbable ; probable ; fréquent.</p>

Informations clefs	Description
Critères d'acceptabilité des risques	<p>Les critères d'acceptabilité des risques ont été déterminés à partir des critères nationaux (circulaire du 10 mai 2010), en associant les niveaux qualitatifs et quantitatifs, c'est-à-dire en tenant compte de la gravité du scénario et de la probabilité associée. Le tableau 24 donne un exemple de critères d'acceptabilité des risques.</p> <p>Les méthodes d'évaluation des risques sont différentes selon qu'il s'agit des personnes ou de l'environnement. Les impacts sur l'environnement ont été examinés au cas par cas selon une approche qualitative.</p> <p>Parties prenantes participant à l'élaboration de la matrice de risque et des critères d'acceptabilité des risques : direction de l'installation ; spécialistes de la sécurité ; autorités locales compétentes.</p>
Mesures de réduction des risques mises en œuvre*	<p>Présence de détecteurs de gaz toxiques et de systèmes d'alarme.</p> <p>Mesures de prévention : tests d'étanchéité réguliers, tuyaux et joints en acier, rinçage à l'azote. Mesures de protection : utilisation de cales et de freins pour les wagons de chlore. Plans d'intervention d'urgence en cas de rejet de gaz toxiques dans l'installation et dans les installations environnantes. Procédure particulière de prévention de la pollution de l'eau.</p>

Tableau 24.
Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (France)

GRAVITÉ des conséquences	PROBABILITÉ (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
Désastreux	NON partiel (établissements nouveaux : note 2) / MMR rang 2 (établissements existants : note 3)	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3	NON Rang 4
Catastrophique	MMR Rang 1	MMR Rang 2 (note 3)	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3
Important	MMR Rang 1	MMR Rang 1	MMR Rang 2 (note 3)	NON Rang 1	NON Rang 2
Sérieux			MMR Rang 1	MMR Rang 2	NON Rang 1
Modéré					MMR Rang 1

Source : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat, « Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études 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 », 10 mai 2010 (<https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=31313>).

2. Hongrie

Le site, d'une superficie d'environ 33 500 m², se trouve à proximité d'une zone résidentielle (300 m) et d'une zone industrielle (100 m) (voir le tableau 25 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 25.

Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Hongrie)

<i>Informations clefs</i>	<i>Description</i>
Scénarios d'incidents majeurs	Présence d'un wagon-citerne de 40 m ³ contenant 50 tonnes de chlore (phase liquide) sous une pression de 4,2 bars (manomètre). Trois scénarios ont été envisagés : une rupture catastrophique, un rejet de 10 minutes et une fuite de 10 mm. Le scénario le plus défavorable est un rejet de 10 minutes. Effets transfrontières considérés comme improbables pour tous les scénarios. L'analyse quantitative complexe des risques tient compte de toutes les conditions météorologiques possibles. Les hypothèses retenues pour les conséquences présentées ci-dessous sont les suivantes : vitesse du vent de 1 m/s et classe de stabilité Pasquill F (atmosphère très stable).
Examen des conséquences des rejets	<p>Le nombre de morts et de blessés attendus est le suivant : Taux de létalité de 100 % : 0 personne (environ 380 m) ; taux de létalité de 50 % : 1 000 personnes (environ 700 m) ; taux de létalité de 10 % : 3 800 personnes (environ 1 300 m) ; taux de létalité de 1 % : 5 000 personnes (environ 2 400 m).</p> <p>Effets sur l'environnement étudiés : impacts des rejets de chlore (gaz toxique dans l'atmosphère). Les zones résidentielles environnantes devront être évacuées.</p> <p>Probabilité de décès calculé à l'aide des fonctions Probit. Le Green Book et le logiciel Safeti 8.4 ont été utilisés pour modéliser les conséquences.</p> <p>Résultats de la modélisation des conséquences : courbes de probabilité de décès en fonction de la distance pour le scénario le plus défavorable (rejet de 50 tonnes de chlore pendant 10 minutes, voir fig. 24) et contours de probabilité de décès pour les conditions météorologiques les plus défavorables (vitesse et direction du vent, stabilité de l'atmosphère) (voir fig. 25).</p>
Probabilité d'occurrence	Événements déclencheurs : défaillance structurelle ; effets domino provenant d'autres installations. Le manuel de référence Bevi Risk Assessments et le Purple Book ont été utilisés pour déterminer la probabilité d'un incident. Probabilité de libération de la totalité du contenu de la citerne en 10 minutes sous la forme d'un jet continu et constant de gaz toxique liquide égale à 5×10^{-6} /an.
Présentation des risques	<p>L'évaluation complète des risques posés par l'installation tient compte de tous les scénarios possibles, y compris la perte de confinement de différents conteneurs, conduites et cuves de traitement. Tous les scénarios susceptibles de contribuer de manière significative au risque individuel en un point donné ou au risque sociétal et qui remplissent les deux conditions suivantes ont été inclus dans l'analyse quantitative du risque : fréquence du scénario $\geq 10^{-9}$/an et risque de blessure mortelle (taux de létalité de 1 %) en dehors des limites du site.</p> <p>La matrice de risque n'a pas été utilisée pour l'évaluation des risques. Éléments présentés : matrice des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, stabilité de l'atmosphère) ; rapport de hiérarchisation des risques ; risques individuels et sociétaux (voir fig. 26 et 27).</p>

Critères d'acceptabilité des risques

Détermination des zones de risque acceptable et inacceptable en fonction du niveau de risque et du nombre de décès (voir fig. 28).

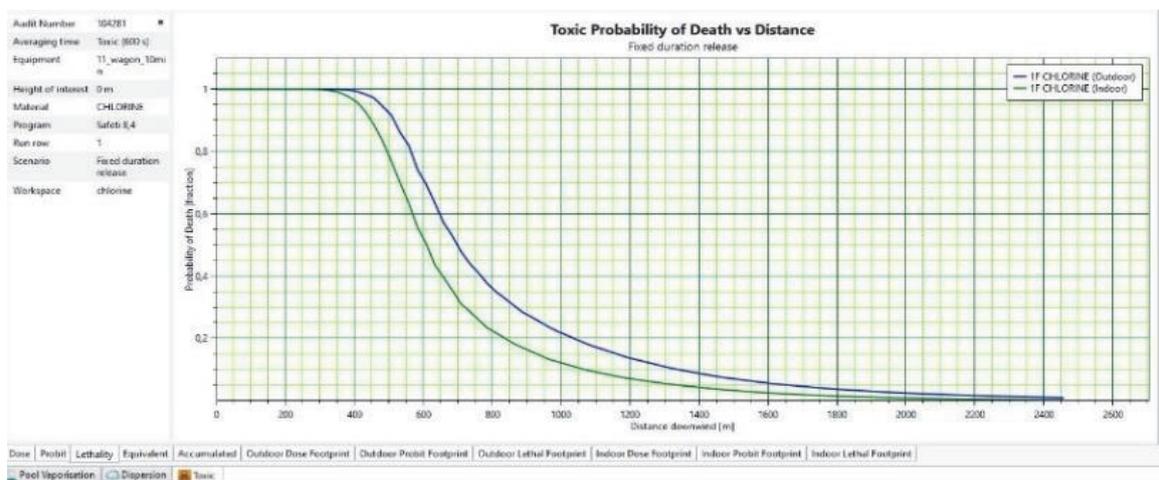
Des critères différents ont été utilisés pour les risques pour les personnes et les risques environnementaux. Les critères relatifs aux risques environnementaux étaient qualitatifs, les règlements ne fournissant que des orientations pratiques. Parties prenantes : exploitant ; consultants agréés.

Mesures de réduction des risques mises en œuvre*

Détecteurs de gaz toxiques et systèmes d'alarme. Systèmes instrumentés de sécurité (niveau, pression et température. Mesures de prévention : rideau d'eau fixe (buses de pulvérisation) autour du point de déchargement des wagons-citernes (environ 20 x 5 m), le système est vérifié manuellement de manière périodique. Plans d'intervention d'urgence interne et externe.

Figure 24.

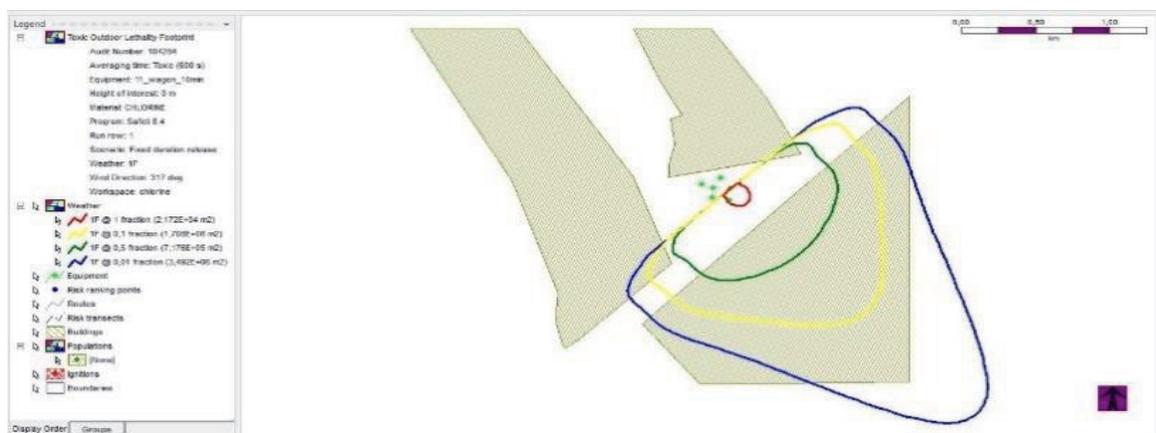
Probabilité de décès en fonction de la distance - rejet de chlore (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

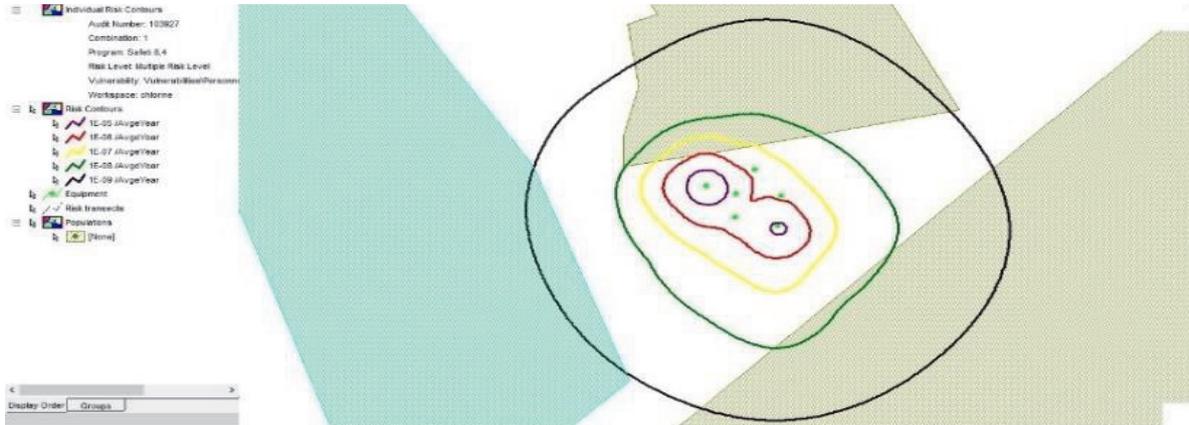
Figure 25.

Contours de probabilité de décès due à la toxicité du chlore - taux de létalité de 1 %, 5 %, 50 % et 100 % (Hongrie)



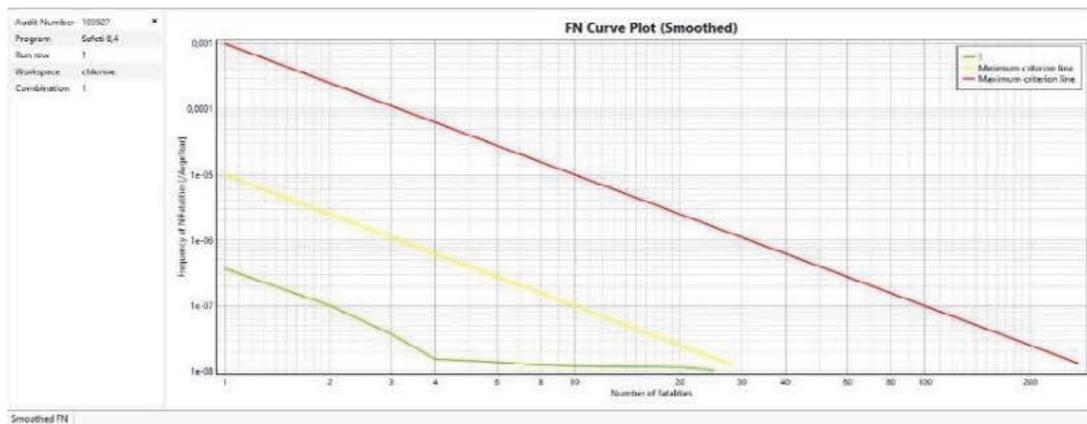
Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 26.
Contours de risque individuel – rejet de chlore (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 27.
Courbe F/N de risque sociétal – rejet de chlore (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

Figure 28.
Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Hongrie)



Source : Iván Domján, Direction générale nationale de la gestion des catastrophes, Hongrie, octobre 2022.

3. Suisse (contexte transfrontière)

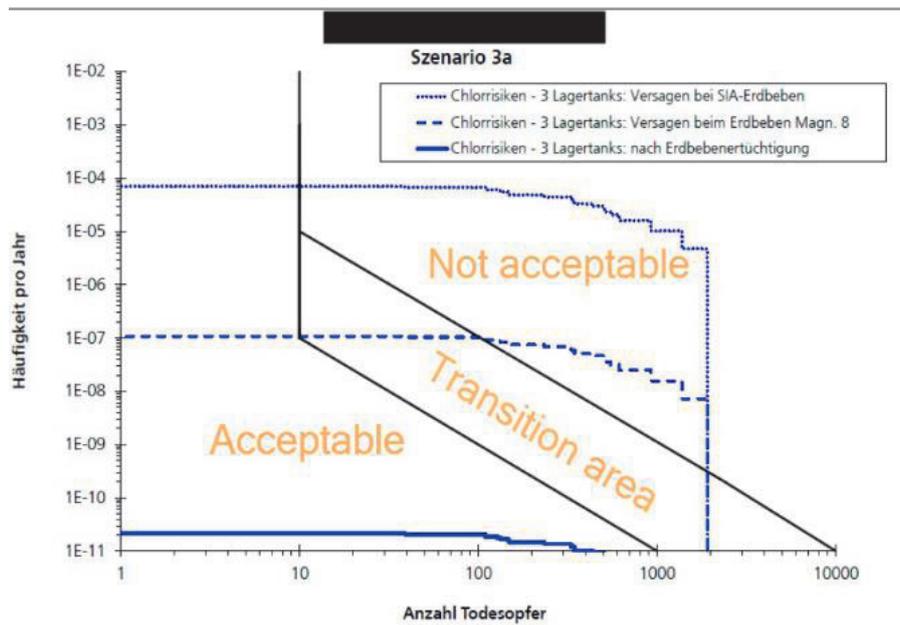
Le site, d'une superficie d'environ 160 000 m², abrite une ancienne installation d'électrolyse de chlorures alcalins implantée dans un parc industriel. Les informations concernant l'exposition du voisinage n'ont pas été fournies. Une exposition transfrontière (Allemagne) a été envisagée (voir le tableau 26 pour le résumé de l'étude de cas).

Tableau 26.

Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière)

Informations clefs	Description
Scénarios d'incidents majeurs	Différents scénarios de rejet de chlore (gaz toxique). Scénario le plus défavorable : destruction des réservoirs de stockage du chlore en cas de séisme. Effets transfrontières considérés comme possibles (pays touché : Allemagne). Le pays voisin a été notifié.
Examen des conséquences des rejets	Conséquences pour les personnes : 2 000 morts selon l'évaluation des risques. En cas de tremblement de terre, aucune évacuation ne serait possible, en raison de la destruction à grande échelle des infrastructures et bâtiments publics. La zone touchée en Allemagne n'étant pas habitée, aucune évaluation quantitative des dommages transfrontières n'a été réalisée. Modélisation des conséquences réalisée à l'aide du logiciel EFFECTS.
Probabilité d'occurrence	Événement déclencheur : tremblement de terre. La probabilité d'occurrence a été déterminée conformément à la norme de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Probabilité d'un séisme dans la région (SIA) : environ 10 ⁻³ /an (une fois tous les 475 ans).
Présentation des risques	Risque sociétal dû à l'exposition au chlore. Évaluation qualitative des risques à l'aide d'une analyse par arbre de défaillances et d'une analyse par arbre d'événements. Évaluation des risques à l'aide d'une matrice de risque. Les niveaux de gravité quantitative de la matrice de risque étaient basés sur le nombre de décès. Les niveaux de probabilité quantitatifs de la matrice de risque sont compris entre 10 ⁻¹ /an et 10 ⁻¹⁰ /an (voir fig. 29).
Critères d'acceptabilité des risques	L'Office fédéral de l'environnement suisse a élaboré un document contenant des critères quantitatifs d'acceptabilité du risque sociétal. Des critères différents ont été utilisés pour les risques pour les personnes et les risques environnementaux. Parties prenantes participant à l'élaboration de la matrice de risque : direction de l'installation ; spécialistes de la sécurité. Détermination de trois zones de risque en fonction de la fréquence annuelle des incidents (axe Y) et du nombre de décès (axe X), à savoir « Acceptable », « Zone intermédiaire » et « Non acceptable » (voir fig. 30). En Suisse, les critères quantitatifs d'acceptabilité des risques sont les mêmes qu'il s'agisse des personnes ou de l'environnement (l'unité de l'axe des X est différente).
Mesures supplémentaires de réduction des risques mises en œuvre	Rénovation parasismique du bâtiment de stockage et concept de barrière secondaire. Plans d'intervention d'urgence en cas de dégagement de gaz toxique dans l'installation, notamment ajout de thiosulfate de sodium au système de gicleurs et camion d'incendie spécial.

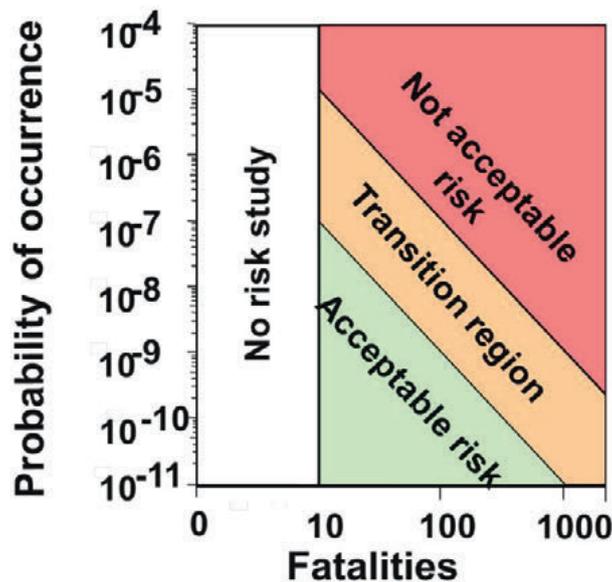
Figure 29.
Présentation des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière)



Source : G. Stebler, Office fédéral de l'environnement, Canton de Bâle-Campagne, Suisse, 2001.

Note : « Häufigkeit pro Jahr » signifie « Fréquence annuelle » ; « Anzahl Todesopfer » signifie « Nombre de décès » ; « Szenario 3a » signifie « Scénario 3a » ; « Chlorrisiken » signifie « Risques liés au chlore » ; « Lagertanks » signifie « Réservoirs de stockage » ; « Versagen bei SIA Erdbeben » signifie « Défaillance en cas de séisme selon les calculs SIA » ; « Versagen beim Erdbeben Magn. 8 » signifie « Défaillance en cas de séisme de magnitude 8 » ; « nach Erdbebenertüchtigung » signifie « après la mise à niveau sismique ».

Figure 30.
Critères d'acceptabilité des risques liés au chlore (Suisse, contexte transfrontière)



Source: M. Merkofer et al., Critères d'évaluation, Office fédéral de l'environnement, Suisse, 2018 (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/beurteilungskriterien-zur-stoerfallverordnung-stfv.html>).

IV. Principales conclusions

Le présent rapport a examiné les méthodes d'évaluation des risques utilisées dans 18 études de cas de pays de la CEE, y compris des exemples transfrontières dans le cas de la Serbie (terminal pétrolier) et de la Suisse (réfrigération à l'ammoniac et chlore). Les études de cas analysées correspondent à cinq types d'installations différentes : GPL/GNL, réfrigération à l'ammoniac, terminaux pétroliers, stockage de nitrate d'ammonium et chlore.

L'examen des évaluations des risques a mis en évidence les points suivants :

- a) Similitudes : La plupart des études de cas présentent des similitudes en ce qui concerne les éléments vulnérables situés à proximité, les bases de données et les ressources utilisées pour déterminer les paramètres d'évaluation des risques tels que la gravité et la probabilité, et les logiciels de modélisation des conséquences ;
- b) Type d'installation : Le type d'installation détermine la principale substance dangereuse et de ce fait le type de conséquences, mais n'a pas d'influence sur la plupart des autres paramètres évalués, tels que les considérations environnementales, le type d'évaluation des risques réalisée, les outils ou les bases de données utilisés. La taille de l'installation et la proximité de zones habitées ont plus d'incidence sur l'ampleur des conséquences que le type d'installation ;
- c) Taille de l'installation : Les études de cas sélectionnées couvrent un large éventail de tailles (1 000 à 600 000 m²) ;
- d) Causes des incidents : Les causes d'incidents les plus courantes mises en évidence par les évaluations sont les erreurs humaines, les défaillances structurelles, les défaillances d'équipements, les problèmes techniques, les défaillances du contrôle des procédés et les catastrophes naturelles (tremblement de terre, orage). Le type d'installation ne semble pas avoir d'incidence significative sur la cause de l'incident. Les causes dépendent plus probablement des caractéristiques du scénario d'incident sélectionné. L'erreur humaine ne figure pas dans la liste des événements déclencheurs indépendants dans tous les scénarios ;
- e) Probabilité : Les probabilités d'occurrence des événements déclencheurs varient considérablement, de 10⁻²/an à 10⁻¹⁴/an ;
- f) Modélisation des conséquences : Plusieurs études de cas comprennent une modélisation des conséquences sur le site et à l'extérieur du site en cas de rayonnement thermique, de dispersion des substances toxiques et d'explosion. Parmi le petit ensemble d'outils logiciels utilisés, on peut citer Phast, Safeti, EFFECTS, ALOHA et BREEZE. On trouvera à l'annexe du présent document une liste répertoriant de nombreux autres logiciels disponibles dans le commerce et leurs applications. L'utilisation d'un nombre limité de progiciels peut faciliter le transfert des résultats entre les parties prenantes ainsi que leur compréhension ;
- g) Bases de données : Parmi les bases de données et les références utilisées pour modéliser les conséquences, on peut citer le Purple Book, le Green Book et le Yellow Book. Les bases de données et références générales employées pour déterminer la probabilité d'un incident sont notamment le Red Book et le Purple Book :
 - a. Les bases de données propres aux pays sont les suivantes : la base de données du RIVM (Pays-Bas), la classification des zones dangereuses, la liste de contrôle des procédures de la TÜV (Allemagne), la base de données du système de gestion des informations de la recherche de l'administration générale (Suisse), les directives relatives à l'aide à la restructuration économique de la Pologne et de la Hongrie, la norme de la Société suisse des ingénieurs et des architectes et la base de données propriétaire d'Arkema ;
 - b. Les « livres de couleur » (Green Book, Yellow Book, Purple Book, Red Book) et les publications du RIVM semblent être des références communes largement utilisées dans différents pays ;
- h) Présentation des risques : Dans la plupart des études de cas, les résultats sont présentés sous la forme de matrices de risque et font appel à des méthodes d'évaluation des risques qualitatives comme quantitatives. La probabilité d'occurrence de la plupart des scénarios d'incidents envisagés pour l'évaluation des risques est faible. Les matrices de risque utilisées

comportent 3 à 5 niveaux de gravité et de probabilité, ce qui semble être la norme pour les évaluations des risques dans les pays de la CEE. Les degrés de gravité et de probabilité dépendent du type de matrice de risque utilisé et varient fortement en fonction des parties prenantes participant à l'évaluation et des critères d'acceptabilité des risques retenus. Les études de cas qui n'ont pas recours aux matrices de risque font appel à des critères d'acceptabilité des risques reposant sur la gravité et la probabilité des incidents, ce qui témoigne d'une approche similaire à celle de la matrice de risque ;

- i) Critères d'acceptabilité des risques : Les critères d'acceptabilité des risques diffèrent sensiblement selon le pays, l'entreprise, la localité et les parties prenantes participant à l'évaluation (spécialistes de la sécurité des procédés, direction et exploitants des installations, autorités compétentes, etc.). Il semble qu'en dernière instance les critères d'acceptabilité des risques dépendent essentiellement de deux facteurs : la réglementation du pays et la matrice de risque élaborée par les parties prenantes. Pour chaque type d'installation, certains pays appliquent des valeurs limites alors que d'autres utilisent des critères d'acceptabilité sur mesure fondés sur le risque individuel ou sociétal, avec des zones acceptables et inacceptables définies en fonction des niveaux de risque et du nombre de décès, comme dans une évaluation de type matrice de risque ;
- j) Aspects environnementaux : Dans la plupart des études de cas, les critères sont différents selon qu'il s'agit de risques pour les personnes ou de risques environnementaux. Très peu de pays examinent les impacts environnementaux de manière quantitative. Les critères relatifs aux risques environnementaux sont des critères qualitatifs dans la majorité des études de cas ;
- k) Aspects transfrontières : Très peu d'études de cas abordent les effets transfrontières. Lorsqu'une évaluation des risques transfrontières doit être réalisée, le choix des critères d'acceptabilité et des sources de données, tant pour les probabilités que pour les conséquences, devrait faire l'objet d'un accord préalable.

Les enseignements tirés de ces études de cas peuvent être utilisés pour améliorer les méthodes d'évaluation des risques existantes et faciliter l'échange d'idées entre les pays de la CEE afin de renforcer la sécurité des installations, des populations voisines et de l'environnement.

Annexe –

Outils logiciels



Liste des outils logiciels actuellement disponibles

La présente annexe répertorie les principaux outils logiciels pouvant être utilisés pour évaluer les risques. Les listes figurant à la présente annexe ne sont pas exhaustives et d'autres outils comparables sont disponibles, y compris des logiciels abandonnés ou hérités qui ne sont plus pris en charge par leur éditeur. L'objectif est de mettre en évidence la variété des solutions disponibles pour mener à bien les différentes tâches de l'évaluation des risques.

I. Logiciels d'analyse des dangers

Bien que des outils logiciels d'analyse des dangers soient disponibles dans le commerce, de nombreuses entités développent leurs propres structures de fichiers dans des logiciels de traitement de texte, des tableurs ou des bases de données (par exemple, la suite Microsoft Office).

Les logiciels présentés dans le tableau A.1 offrent un cadre permettant de conduire des analyses des dangers liés aux procédés, de les documenter et de s'appuyer sur des études antérieures.

Tableau A.1.
Logiciels d'analyse des dangers

Nom	Hazop+ ⁷⁴	PHA Pro ⁷⁵	PHA-Tool ⁷⁶	PHAWorks ⁷⁷
Concepteur	Isograph	Sphera	BakerRisk	Primatech
Finalité	HazOp	Analyse des dangers liés aux procédés (diverses méthodes)		
Utilisation	Documentation et gestion des dangers liés aux procédés			
Avantages	Prise en charge de la méthode HazOp	Prise en charge des méthodes HazOp et « What If » ; registre des hypothèses et journal des modifications inclus. Matrice de risque interactive personnalisable ; possibilité de regrouper les recommandations.		
Limites	Autres méthodes non prises en charge	Modules supplémentaires nécessaires pour l'analyse avancée		
Disponibilité	Sous licence			

Abréviation : HazOp = analyse des dangers et de l'exploitabilité.

II. Logiciels d'analyse par arbre d'événements ou par arbre de défaillances

Plusieurs outils logiciels d'analyse des risques – analyses par arbre de défaillances (AAD) et par arbre d'événements (AAE), d'une part, et analyses connexes des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) et des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), d'autre part – sont disponibles dans le commerce, y compris des versions gratuites aux fonctionnalités limitées et des options reposant sur l'informatique en nuage (*cloud*) ou accessibles en ligne (voir tableau A.2).

⁷⁴ Disponible à l'adresse suivante : www.isograph.com/software/hazop/.

⁷⁵ Disponible à l'adresse suivante : <https://sphera.com/pha-pro-software/>.

⁷⁶ Disponible à l'adresse suivante : www.bakerrisk.com/products/software-tools/pha-tool.

⁷⁷ Disponible à l'adresse suivante : www.primatech.com/software/phaworks.

Tableau A.2.

Logiciels d'analyse par arbre d'événements ou par arbre de défaillances

Nom	CAFTA ⁷⁸	ITEM ToolKit ⁷⁹	Reliability Workbench/ FaultTree+ ⁸⁰	RAM Commander ⁸¹	RiskSpectrum ⁸²
<i>Concepteur</i>	EPRI	ITEM Software	Isograph	ALD Software Limited	Lloyd's Register
<i>Finalité</i>	AAD, AAE	AAD, AAE, AMDE/AMDEC	AAD, AAE, AMDE/AMDEC	AAD, AAE, AMDEC	AAD, AAE
<i>Utilisation</i>	Analyse générique par arbre de défaillances et par arbre d'événements		Modélisation et analyse des arbres de défaillances et des arbres d'événements connexes	Évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques ou mécaniques	Modélisation et analyse des arbres de défaillances et des arbres d'événements connexes
<i>Avantages</i>	Simplification de la modélisation des conséquences des accidents grâce aux arbres d'événements. Intégration facile des arbres de défaillances, des arbres d'événements et de la base de données de fiabilité	Hierarchisation des éléments en fonction de leur importance ; intégration avec d'autres modules portant sur la fiabilité et le calcul des coûts du système	Bibliothèques intégrées de données sur les défaillances. Possibilité d'associer des modules consacrés à la fiabilité	Analyse détaillée au niveau de l'équipement ou du système ; analyse de sensibilité	Possibilité d'associer des modules consacrés aux composantes de risque, notamment l'analyse de la fiabilité humaine. Possibilité de prendre en compte des événements internes, locaux (incendies et inondations) et externes (séismes).
<i>Prise en compte des conditions propres au site</i>	Oui				Oui
<i>Limites</i>	Accès au logiciel réservé aux membres de l'EPRI	Données de fiabilité à personnaliser par l'utilisateur		Adapté aux normes de l'industrie aérospatiale, de la défense et des transports	Algorithme de calcul protégé. Accent mis sur l'industrie nucléaire

⁷⁸ Disponible à l'adresse suivante : www.epri.com/research/products/000000003002004316.

⁷⁹ Disponible à l'adresse suivante : www.itemsoft.com/item_toolkit.html.

⁸⁰ Disponible à l'adresse suivante : www.isograph.com/software/reliability-workbench/fault-tree-analysis-software/.

⁸¹ Disponible à l'adresse suivante : <https://aldservice.com/reliability-products/rams-software.html>.

⁸² Disponible à l'adresse suivante : www.lr.org/en/riskspectrum/technical-information/psa/.

Nom	CAFTA ⁷⁸	ITEM ToolKit ⁷⁹	Reliability Workbench/ FaultTree+ ⁸⁰	RAM Commander ⁸¹	RiskSpectrum ⁸²
Disponibilité	Sous licence ; la version de démonstration ne permet pas d'enregistrer des fichiers	Sous licence ; la version de démonstration ne permet pas d'enregistrer des fichiers, la durée des sessions est limitée	Sous licence	Sous licence	Sous licence

Abréviations : EPRI = Electric Power Research Institute.

III. Logiciels d'analyse quantitative des risques

Le tableau A.3 présente un aperçu des logiciels d'analyse quantitative des risques disponibles dans le commerce.

Tableau A.3.
Logiciels d'analyse quantitative des risques

Nom	ARIPAR ⁸³	FLACS-RISKCURVES ⁸⁴	QRATool ⁸⁵	RAPID-N ⁸⁶	Safeti ⁸⁷	IEPHERD ⁸⁸
Concepteur	JRC	TNO (Propriétaire : GexCon)	BakerRisk	JRC	DNV	Shell (Propriétaire : GexCon)
Description	Évaluation quantitative de l'exposition aux risques d'une zone, sur la base de l'évaluation des risques résultant d'accidents majeurs liés à des substances dangereuses	Quantification des risques liés au stockage et au transport de substances dangereuses pour la population et les infrastructures voisines (zone urbaine et installations chimiques)	Compilation des conséquences calculées par le logiciel SafeSite et application des informations sur la fréquence	Accidents NaTech dans les infrastructures chimiques critiques	Analyse quantitative des risques liés aux installations de traitement, de chimie et de pétrochimie (à terre)	Logiciel de gestion des risques conçu pour les installations et opérations à terre
Finalité	Polyvalent	Polyvalent	Polyvalent	NaTech	Polyvalent	Pétrole/gaz (à terre)

⁸³ Disponible à l'adresse suivante : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC66551>.

⁸⁴ Disponible à l'adresse suivante : <https://gexcon.com/products-services/riskcurves-software/>.

⁸⁵ Disponible à l'adresse suivante : www.bakerrisk.com/products/software-tools/qratool/.

⁸⁶ Outil d'évaluation rapide des risques NaTech, disponible à l'adresse suivante : <https://rapidn.jrc.ec.europa.eu/>.

⁸⁷ Disponible à l'adresse suivante : <https://dnv.com/safeti>.

⁸⁸ Disponible à l'adresse suivante : <https://gexcon.com/products-services/shell-shepherd-software/>.

Nom	ARIPAR ⁸³	FLACS-RISKCURVES ⁸⁴	QRATool ⁸⁵	RAPID-N ⁸⁶	Safeti ⁸⁷	IEPHERD ⁸⁸
<i>Utilisation</i>	Contours de risque et courbes F/N	Évaluation des activités ou scénarios à haut risque, planification urbaine, critères réglementaires et critères de l'entreprise	Évaluation et hiérarchisation des risques d'explosion, d'incendie et de toxicité et stratégies d'atténuation. Détermination des risques individuels ou sociétaux. Cartographie des conséquences	Accidents NaTech impliquant des rejets de substances dangereuses, des incendies et des explosions	Contours de risque, courbes F/N et hiérarchisation des facteurs de risque. Prise en compte des populations voisines et des conditions météorologiques locales	Analyse des risques
<i>Prise en compte des risques liés au transport de produits chimiques</i>	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
<i>Avantages</i>	Définition des zones de risques faisant appel à une plateforme SIG	Architecture ouverte permettant l'utilisation de données provenant de différents logiciels	Comparaison des risques individuels ou sociétaux en fonction des options sélectionnées	Seul outil connu pour les accidents NaTech	Bibliothèque de produits chimiques incluse	
<i>Résultats rapides</i>	Oui				Oui	
<i>Cartographie des zones de risque</i>	Oui		Oui		Oui	Oui
<i>Analyse de sensibilité</i>	Oui					Oui
<i>Vérification et validation accessibles au public</i>	Oui	Oui (dans le Yellow Book)		Oui		
<i>Prise en compte des conditions propres au site</i>	Oui		Oui		Oui	Oui
<i>Limites</i>	Modèles physiques non décrits	Nécessité de disposer de données complexes	Utilisation exclusive des résultats de l'analyse des conséquences de SafeSite, sans possibilité d'importer d'autres données	Utilisation des données figurant dans les directives pour l'analyse des conséquences hors site du programme de gestion des risques de l'EPA (<i>RMP Guidance for Off-site Consequence Analysis</i>)	Modèles intégraux	Pas de modélisation des rejets toxiques

Nom	ARIPAR ⁸³	FLACS-RISKCURVES ⁸⁴	QRATool ⁸⁵	RAPID-N ⁸⁶	Safeti ⁸⁷	IEPHERD ⁸⁸
Pas de modélisation des conséquences environnementales	X		X	X	X	X
Vérification et validation inaccessibles au public			X		X	X
Disponibilité	Abandonné	Sous licence	Sous licence	Gratuit avec déclaration de renonciation	Sous licence	Sous licence

Abréviations : EPA = Agence de protection de l'environnement des États-Unis ; RMP = Programme de gestion des risques ; SIG = système d'information géographique.

IV. Logiciels d'analyse des conséquences

Le tableau A.4 présente un aperçu des logiciels d'analyse des conséquences disponibles dans le commerce.

Tableau A.4.
Logiciels d'analyse des conséquences

Nom	ADAM ⁸⁹	ALOHA ⁹⁰	BREEZE ⁹¹	CANARY ⁹²	DEGADIS ⁹³
Concepteur	JRC	EPA	Trinity Consultants	Quest Consultants	EPA
Description	Calcul des effets physiques des accidents industriels : rejet involontaire d'une substance dangereuse, incendie d'origine chimique, effet de souffle d'une explosion de nuage de vapeur et inhalation de vapeurs chimiques toxiques	Modélisation des rejets chimiques pour les services d'intervention d'urgence et les responsables élaborant les plans d'urgence. Calcul de la dispersion des nuages toxiques résultant d'un rejet de produits chimiques et élaboration de plusieurs scénarios d'incendie et d'explosion	Plateforme multimodule de modélisation de la dispersion atmosphérique ; modélisation des incendies, des explosions, des rejets toxiques dans l'air, des conséquences pour la santé humaine et des impacts environnementaux. Basé sur le logiciel développé par l'EPA (AERMOD)	Outil de modélisation des conséquences et des risques intégrant des calculs thermodynamiques dans la simulation des rejets de fluides variables dans le temps	Modélisation du transfert des rejets de produits chimiques toxiques dans l'atmosphère

⁸⁹ Accident Damage Analysis Module (ADAM), disponible à l'adresse suivante : <https://adam.jrc.ec.europa.eu/en/adam/content>.

⁹⁰ Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA), disponible à l'adresse suivante : <https://epa.gov/cameo/aloha-software>.

⁹¹ Disponible à l'adresse suivante : www.trinityconsultants.com/software.

⁹² Disponible à l'adresse suivante : www.questconsult.com/software/canary/.

⁹³ Dense Gas Dispersion Model (DEGADIS), disponible à l'adresse suivante : https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=&direntid=2904.

Nom	ADAM ⁸⁹	ALOHA ⁹⁰	BREEZE ⁹¹	CANARY ⁹²	DEGADIS ⁹³
<i>Utilisation</i>	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et toxiques	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et toxiques	Modélisation des conséquences de divers scénarios	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et des pertes de confinement	Dispersion des rejets toxiques (rejet continu, instantané, à durée déterminée ou variable dans le temps)
<i>Termes sources⁹⁴</i>	Oui	Saisie manuelle	Oui	Oui	Saisie manuelle
<i>Effets physiques⁹⁵</i>	Tous	Dispersion	Tous	Tous	Dispersion
<i>Vulnérabilités⁹⁶</i>	Oui	Oui	Oui	Oui	Intensité d'exposition
<i>Avantages</i>	Outil simple à utiliser, destiné aux autorités compétentes de l'Union européenne et conçu pour permettre l'inclusion des règlements et directives de l'Union européenne dans la modélisation des conséquences	Fourniture de résultats corrects assez rapidement pour que les secouristes puissent les utiliser. Intégration des conditions en temps réel aux États-Unis. Facilité d'utilisation sur le terrain	Possibilité de modéliser des rejets variables dans le temps ; modules pour le GNL/GPL ; outils améliorés de visualisation et de traitement des données exportées	Base de données de produits chimiques. Possibilité de comparer les modèles de risques – dispersion des vapeurs, rayonnement d'un incendie ou explosion de nuage de vapeur – en fonction de la concentration de gaz, du flux énergétique ou de la surpression	Modélisation de diverses conditions de rejets de gaz denses
<i>Limites</i>	Logiciel non utilisable par des organisations non gouvernementales	Simplification de certains modèles pour faciliter l'utilisation et augmenter la rapidité d'obtention des résultats	Module ExDAM inadapté aux profils de pression variables dans le temps ou aux impulsions, et inapplicable aux espaces encombrés	Aucune limite connue	Simulation d'un seul ensemble de conditions météorologiques. Limité aux gaz denses
<i>Disponibilité</i>	Gratuit ⁹⁷	Gratuit	Sous licence ⁹⁸	Sous licence	Gratuit

⁹⁴ Quantité de produit chimique libérée en cas de perte de confinement, y compris les paramètres chimiques entrant en jeu.

⁹⁵ Dispersion de gaz toxiques, rayonnement thermique résultant d'un incendie, surpression résultant d'une explosion, etc.

⁹⁶ Préjudices découlant des effets physiques, tenant compte de la probabilité, de la durée et de l'intensité de l'exposition.

⁹⁷ Réservé aux autorités compétentes de l'Union européenne, aux pays voisins de l'Union européenne et aux pays de l'Organisation de coopération et de développements économiques assumant des responsabilités en matière de gestion des risques chimiques. Les organisations non gouvernementales (industrie, consultants externes, etc.) n'y ont pas accès.

⁹⁸ AERMOD disponible gratuitement auprès de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis à l'adresse suivante : www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod.

Nom	exploCFD ⁹⁹	FLACS-CFD ¹⁰⁰	FLACS-EFFECTS ¹⁰¹	Fluidyn ¹⁰²	FRED ¹⁰³
Concepteur	Advanced Analysis Australia	GexCon	TNO (Propriétaire : GexCon)	Fluidyn	Shell (Propriétaire : GexCon)
Description	Exclusivement conçu pour les effets des explosions. Des modèles détaillés sont disponibles pour les BLEVE, les explosifs puissants et les nuages de poussière	Modélisation CFD tridimensionnelle des rejets de produits inflammables et toxiques. Prise en compte des facteurs aggravants et atténuants, y compris le confinement et les engorgements dus à la géométrie réelle, la ventilation et le réseau d'extinction d'incendie	Modélisation du comportement des gaz toxiques ou inflammables, des gaz liquéfiés et des liquides de leur libération aux effets physiques qui en résultent	Plateforme de modélisation CFD avec des modules correspondant à des scénarios particuliers	Outil de modélisation des conséquences reposant sur un modèle thermodynamique avancé qui permet d'utiliser une représentation étendue de combustible multicomposant dans presque tous les modèles
Utilisation	Modélisation des explosions	Analyse des conséquences avec visualisation tridimensionnelle détaillée	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et toxiques	Modélisation CFD des rejets de produits inflammables et toxiques	Analyse des conséquences de rejets de produits inflammables
Termes sources	Oui	Oui (DIPPR)	Oui (DIPPR)	Saisie manuelle	Oui (modèle thermodynamique de combustible multicomposant)
Effets physiques	Explosion	Tous	Tous	Tous	Tous
Vulnérabilités	Effets d'un incendie ou d'une explosion	Effets tridimensionnels de la surpression résultant d'une explosion ou du rayonnement thermique résultant d'un incendie	Exposition résultant de la dispersion, conséquences pour les personnes, létalité	Intensité d'exposition au feu, intensité d'exposition aux gaz toxiques, contours de pression (explosion)	Effets d'un incendie, d'un rejet de produits toxiques ou d'une explosion

⁹⁹ Disponible à l'adresse suivante : www.advanalysis.com/explocfd.

¹⁰⁰ Disponible à l'adresse suivante : <https://gexcon.com/products-services/flacs-software/>.

¹⁰¹ Disponible à l'adresse suivante : <https://gexcon.com/products-services/effects-consequence-modelling-software/>.

¹⁰² Disponible à l'adresse suivante : www.fluidyn.com/?page_id=96.

¹⁰³ Fire, Release, Explosion and Dispersion (FRED), disponible à l'adresse suivante : <https://gexcon.com/products-services/shell-fred-software/>.

Nom	exploCFD ⁹⁹	FLACS-CFD ¹⁰⁰	FLACS-EFFECTS ¹⁰¹	Fluidyn ¹⁰²	FRED ¹⁰³
<i>Avantages</i>	Facilité d'utilisation, aucune construction géométrique requise, modélisation des explosions de TNT, de nitrate d'ammonium, de poussières et de gaz	Prise en compte des caractéristiques géométriques pour les incendies, les explosions et les rejets toxiques	Prise en compte des dommages structurels	Module PANFIRE : examen des effets des systèmes de protection active et passive Module VENTIL : étude des effets dans les espaces confinés Module FLOWSOL : évaluation de l'impact environnemental des rejets liquides, notamment la pollution des eaux souterraines	Développement et validation reposant sur un vaste programme d'expériences à grande échelle, des investissements substantiels, des projets industriels conjoints et des publications scientifiques
<i>Limites</i>	Limité aux incendies et aux explosions, pas de modélisation de la dispersion de substances toxiques	Calculs coûteux	Expérience considérable nécessaire à la validation des modèles et des résultats	Aucune limite connue	Pas de modélisation des rejets toxiques. Accent mis sur l'industrie offshore
<i>Disponibilité</i>	Sous licence	Sous licence	Sous licence	Sous licence	Sous licence

Nom	KFX ¹⁰⁴	MET ¹⁰⁵	Phast ¹⁰⁶	SAFER One ¹⁰⁷	SafeSite 3G ¹⁰⁸
<i>Concepteur</i>	DNV	ISi Technologie GmbH	DNV	SAFER SYSTEMS	BakerRisk
<i>Description</i>	Modélisation CFD de la dispersion, des incendies et des explosions dans les zones encombrées	Évaluation des risques liés aux accidents chimiques et calcul des rejets de substances toxiques et de particules solides, du rayonnement thermique résultant d'un incendie et de la surpression résultant d'une explosion	Étude de l'évolution d'un incident, depuis le rejet initial jusqu'à l'analyse de la dispersion en champ lointain, en passant par la modélisation de la propagation et de l'évaporation de la nappe, sans oublier la toxicité et l'inflammabilité	Modélisation en temps réel des rejets chimiques ou des événements de combustion afin de faciliter les interventions d'urgence. Superposition du plan de l'installation sur des cartes avec les informations sur la circulation et les données météorologiques afin de fournir une image instantanée de la situation en temps réel	Simulation du rejet de produits chimiques, de la dispersion, de la propagation et de la volatilisation de la nappe, des feux torche (jets enflammés) et feux en nappe, de l'explosion d'un nuage de vapeur et des vulnérabilités en cas d'incendie, d'incident impliquant des produits toxiques et d'explosion

¹⁰⁴ Kameleon FireEx (KFX), disponible à l'adresse suivante : www.dnv.com/services/fire-simulation-software-cfd-simulation-kameleon-fireex-kfx-110598.

¹⁰⁵ Models for Effects with Toxic and flammable gases (MET), disponible à l'adresse suivante : www.isitech.com/met-fuer-windows.html.

¹⁰⁶ Disponible à l'adresse suivante : <https://dnv.com/phast>.

¹⁰⁷ Disponible à l'adresse suivante : <https://safersystem.com/products/safer-one/>.

¹⁰⁸ Disponible à l'adresse suivante : www.bakerrisk.com/products/software-tools/qratool/.

Nom	KFX ¹⁰⁴	MET ¹⁰⁵	Phast ¹⁰⁶	SAFER One ¹⁰⁷	SafeSite 3G ¹⁰⁸
<i>Utilisation</i>	Analyse des conséquences des incendies et explosions dans des zones encombrées	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et toxiques et de substances très actives	Analyse des conséquences des rejets de produits inflammables et toxiques	Intervention et communication d'urgence en temps réel à l'échelle de l'organisation	Analyse des conséquences de plusieurs types de scénarios
<i>Termes sources</i>	Oui	Saisie manuelle	Oui	Saisie manuelle	Saisie manuelle
<i>Effets physiques</i>	Incendie, dispersion	Tous	Tous	Dispersion	Tous
<i>Vulnérabilités</i>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
<i>Avantages</i>	Prise en compte des zones encombrées, des conditions météorologiques et des systèmes de lutte contre l'incendie utilisant de l'eau. Large éventail de scénarios de fuites de liquide et de gaz et d'incendies. Optimisation de la protection passive contre l'incendie	Examen de l'incompatibilité chimique. Résultats rapides	Applicable à la conception et à l'exploitation des installations. Largement utilisé et considéré comme une norme industrielle	Simulation en temps réel ; intégration avec les capteurs de gaz et les capteurs météorologiques ; service en nuage	Modélisation des rejets, de la dispersion et de l'explosion validée par des données historiques et des essais menés par le concepteur. Peut être utilisé pour le transport routier
<i>Limites</i>	Accent mis sur l'industrie pétrolière		Plusieurs extensions nécessaires selon la modélisation souhaitée. Simplification de certains modèles d'explosion	Modèles physiques inconnus, pas de modélisation proactive/statique des rejets	Accent mis sur les installations à terre. Interface utilisateur complexe
<i>Disponibilité</i>	Sous licence	Sous licence	Sous licence	Sous licence	Sous licence

Abréviations : BLEVE = vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition ; CFD = mécanique des fluides numérique ; DIPPR = Design Institute for Physical Properties ; TNT = trinitrotoluène.

Évaluation des risques pour la prévention des accidents industriels

L'évaluation des risques que posent les installations industrielles est un élément essentiel de la prévention des accidents industriels. La Convention de la Commission économique pour l'Europe (CEE) sur les effets transfrontières des accidents industriels a pour objet d'aider ses Parties et les pays intéressés à prévenir les accidents industriels, en particulier ceux ayant des effets transfrontières, à s'y préparer et à y faire face. Elle favorise en outre la coopération transfrontière entre ses Parties, voire au-delà. Étant donné qu'elle contient aussi des dispositions relatives à l'évaluation des risques, la CEE a organisé un séminaire sur les méthodes d'évaluation des risques (Genève, 4 décembre 2018), dont l'objectif était d'aider ses États membres à appliquer les dispositions en question. À l'issue du séminaire, les participants ont formulé des conclusions et des recommandations concernant les difficultés rencontrées dans l'évaluation des risques transfrontières liés aux installations industrielles et la nécessité d'un échange d'informations plus intense sur les méthodes utilisées dans la région de la CEE, et notamment sur les outils logiciels disponibles. La présente publication a été établie dans cette optique.

Élaborée sous les auspices de la Convention, la présente publication se compose de deux parties. La première donne un aperçu général, quoique non exhaustif, des méthodes d'évaluation des risques applicables aux activités dangereuses et revient notamment sur celles utilisées dans la région de la CEE. La seconde réunit 18 études de cas soumises par des pays de la région : elles portent sur l'application de telles méthodes à des installations industrielles et sur les outils logiciels servant à faciliter ces évaluations. Elles couvrent cinq types d'installations, à savoir les réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié/gaz de pétrole liquéfié, les installations de réfrigération à l'ammoniac, les terminaux pétroliers, les installations de stockage de nitrate d'ammonium et les installations de production de chlore. La présente publication constitue une ressource pour les autorités nationales, les décideurs, les exploitants et quiconque souhaite approfondir sa connaissance de l'évaluation des risques que présentent les installations industrielles en vue de mieux prévenir les accidents

Information Service
United Nations Economic Commission for Europe

Palais des Nations
CH - 1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41(0)22 917 12 34
E-mail: unece_info@un.org
Website: <http://www.unece.org>