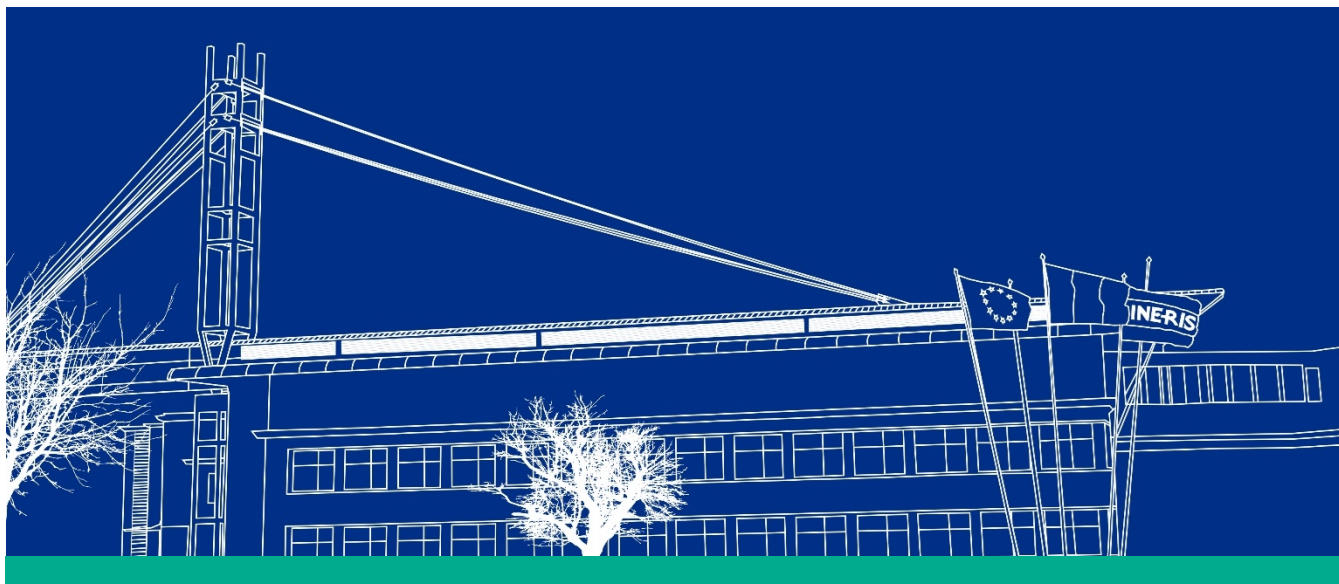




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212043 - 2778617 - v2.0

22/10/2025

Rideaux d'eau : atténuer les effets d'une dispersion de nuage toxique

Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.)

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : PENELON Thibault - RODRIGUES MARTA

Vérification : GENTILHOMME OLIVIER; JOUBERT LAURIS; ADJADJ AHMED

Approbation : Document approuvé le 22/10/2025 par BOUET REMY

Table des matières

1	Fonction de sécurité assurée	6
2	Objet de la fiche.....	7
3	Description générale.....	9
3.1	Atténuation d'un nuage toxique : principes.....	10
3.2	Techniques de rideaux d'eau pulvérisée	10
3.2.1	Eléments de terminologie	10
3.2.2	Rideau simple	11
3.2.3	Rideau multi-buses	12
3.2.4	Rideau multi-rampes.....	12
3.3	Equipements.....	12
3.3.1	Rampes	12
3.3.2	Types de buses	13
3.3.3	Pompes / surpresseurs.....	14
3.3.4	Dispositif d'évacuation/traitement des eaux	14
3.4	Architecture du système	14
3.4.1	Alimentation en eau	14
3.4.2	Détection.....	15
3.4.3	Traitement.....	15
3.4.4	Action.....	15
3.5	Modes de défaillance d'un dispositif de type « rideau d'eau »	15
4	Critères d'évaluation des performances	19
4.1	Indépendance	19
4.2	Efficacité	19
4.3	Temps de réponse.....	24
4.4	Niveau de confiance	25
5	Tests et maintenance	27
5.1	Tests périodiques et maintenance.....	27
5.2	Gestion des modifications.....	28
6	Liste des sources utilisées.....	29

Table des illustrations

Figure 1: Typologie des Barrières Techniques de Sécurité, Ω 10.....	7
Figure 2. Exemples de rideaux d'eau déployés manuellement.....	9
Figure 3. Effet d'un rideau d'eau ascendant sur un nuage de HF – campagne expérimentale Goldfish 1986 (Koopman, 2016).....	10
Figure 4. Exemples de rideaux d'eau « simples » : à gauche, rideau d'eau descendant (source : Ineris) ; à droite, lance « queue de paon » (source : IFP Training).....	11
Figure 5. Exemple de rampe de rideau d'eau multi-buses (source DESAUTEL).....	12
Figure 6. Exemple de formes de jet selon le type de buse : à gauche, jet conique plein ; à droite, jet plat (source : VKI).....	13
Figure 7. Exemple de mesures laser de distribution de vitesses (à gauche) et de diamètres (à gauche) de gouttes dans un jet plat généré par une même buse avec une pression d'eau de 6 bar (en haut, diamètre de Sauter = 167,5 μm) et de 11 bar (en bas, diamètre de Sauter = 130,9 μm) [source : PNR].....	13
Figure 8. Exemples d'évolution de l'efficacité d'un rideau d'eau sur un nuage de gaz : à gauche, ammoniac et acide fluorhydrique, selon une approche de modélisation (Fthenakis, et al., 1995) ; à droite, acide fluorhydrique, selon une approche expérimentale.....	20
Figure 9. Exemple de graphe d'efficacité (noté η_D) d'un rideau d'eau en fonction du ratio Rm , extrait de.....	22
Figure 10. Association d'un mur et d'un rideau d'eau, pour améliorer l'efficacité de ce dernier	23
Figure 11. Illustration d'un dispositif favorisant les interactions gaz/rideau d'eau ascendant	23

Résumé

La sécurité des installations industrielles repose sur l'utilisation de barrières de sécurité, valorisées comme des mesures de maîtrise des risques dans une Étude de Dangers (EDD).

Dans ce contexte, les rideaux d'eau sont des dispositifs de protection ayant pour objectif d'atténuer les effets d'une dispersion aérienne accidentelle de produits toxiques, par abattage, capture, déviation des gaz toxiques.

Cette fiche présente les principes de fonctionnement des installations à rideaux d'eau pulvérisée ainsi que les éléments nécessaires pour vérifier le respect des critères de performance définis par la méthode Ω 10 (Ineris, 2018) et les articles 2 et 4 de l'arrêté du 29 septembre 2005 : efficacité, temps de réponse, test / maintenance et niveau de confiance.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Rideaux d'eau : atténuer les effets d'une dispersion de nuage toxique, Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 212043 - 2778617 - v2.0.

Mots-clés :

Fiche Barrière, Barrière technique de sécurité, Système Instrumenté de Sécurité, MMR, MMRI, Rideau d'eau, Abattage.

1 Fonction de sécurité assurée

Un dispositif de rideau d'eau est constitué en bout de chaîne d'une ou plusieurs tuyauteries (« rampes ») équipées de buses de pulvérisation d'eau positionnées à intervalle régulier. L'ensemble des rejets aux buses forme un écran d'eau pulvérisée (brouillard de gouttelettes plus ou moins fines).

Les fonctions de sécurité assurées par un rideau d'eau pulvérisée peuvent être :

- Protéger une cible des effets d'un incendie par atténuation du flux thermique incident ;
- Protéger une cible d'une exposition toxique par inhalation, par atténuation des concentrations en gaz, vapeurs ou poussières dans l'air, ou encore de la formation et de la dérive d'un nuage inflammable.

La présente fiche traite exclusivement de la seconde fonction de sécurité, consistant à atténuer les concentrations de gaz, vapeurs, poussières dans l'air, en insistant plus particulièrement sur les gaz et vapeurs.

Cette fiche ne traite pas des dispositifs d'arrosage visant à atténuer la propagation, voire à éteindre un incendie. La fiche « Moyens fixes de lutte contre l'incendie - Stockages de liquides inflammables et de gaz inflammables liquéfiés » disponible sur le site Ineris¹ fournit des informations supplémentaires à ce sujet.

¹ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts-moyens-fixes-lutte-contre-incendie>

2 Objet de la fiche

Cette fiche présente des éléments de synthèse relatifs à l'évaluation des performances des dispositifs d'atténuation par rideau d'eau pulvérisée, intégrés à des barrières techniques de sécurité dans le cadre des installations classées.

L'arrêté du 29 septembre 2005 (dit arrêté PCIG) précise qu'il est nécessaire que les études de dangers examinent les performances des mesures de maîtrise des risques et qu'une justification de leur niveau de performance établi soit fournie.

L'article 2 de cet arrêté dispose que « *La méthode d'évaluation de la probabilité peut s'appuyer sur la fréquence des événements initiateurs spécifiques ou génériques et sur les niveaux de confiance des mesures de maîtrise des risques agissant en prévention ou en limitation des effets.* »

L'article 4 de cet arrêté dispose que « *pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de maîtrise des risques doivent être efficaces, avoir une cinétique de mise en œuvre en adéquation avec celle des événements à maîtriser, être testées et maintenues de façon à garantir la pérennité du positionnement précité.* »

Dans cette optique, la méthode de définition et d'évaluation des barrières de sécurité (mesures de maîtrise des risques dans le cadre d'une EDD) doit être explicitée en s'appuyant sur les critères définis aux articles 2 et 4 de l'arrêté précité. Pour cela, l'Ineris a développé des méthodes génériques d'évaluation des barrières techniques (Ω 10) et humaines (Ω 20) de sécurité.

La typologie des barrières techniques de sécurité présentées dans le rapport Ω 10 est reprise dans la figure ci-dessous :

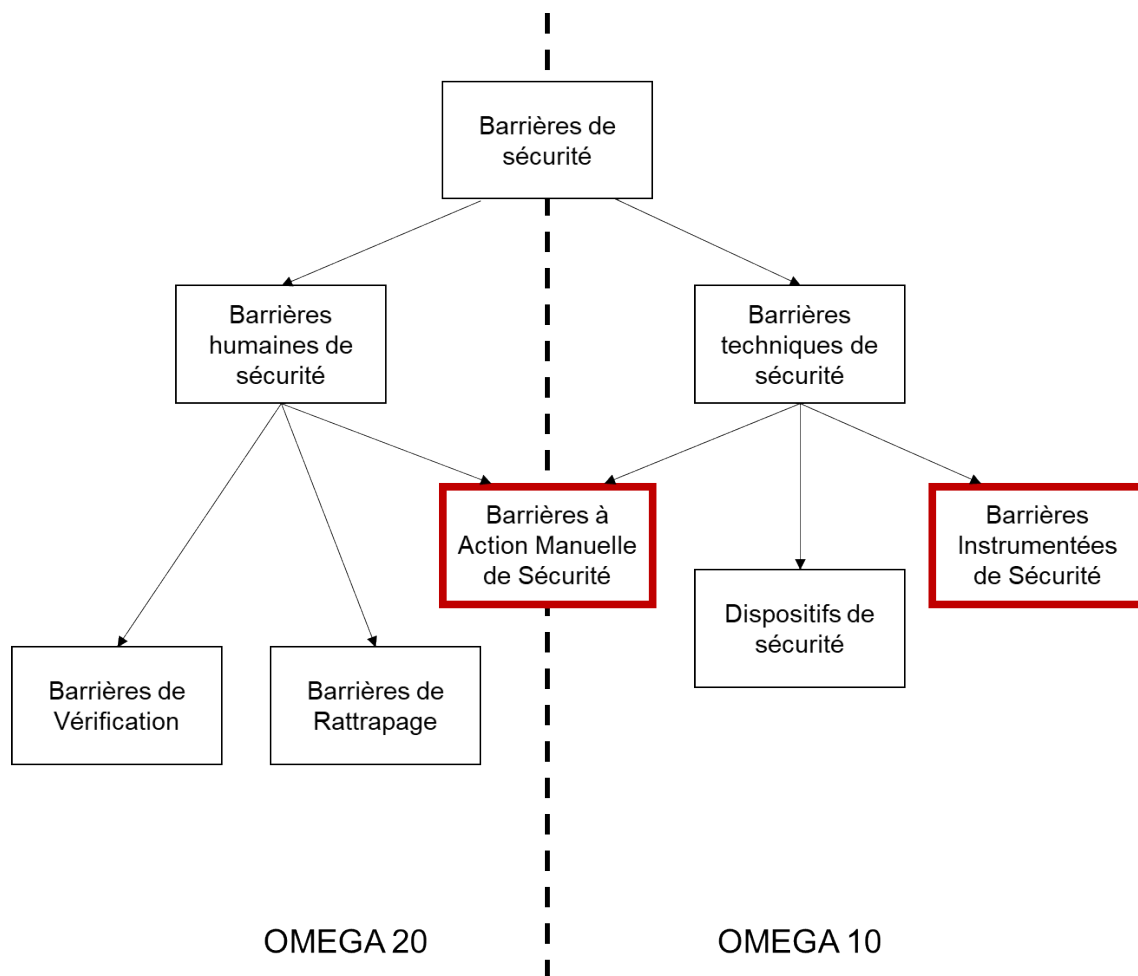


Figure 1: Typologie des Barrières Techniques de Sécurité, Ω 10

Dans l'approche de l' Ω 10, on définit les barrières de sécurité comme l'ensemble des éléments techniques et humains nécessaires à la réalisation d'une fonction de sécurité.

Un dispositif d'atténuation par rideau d'eau correspond à une Barrière Instrumentée de Sécurité (BIS). Les barrières instrumentées de sécurité sont constituées par une chaîne de traitement comprenant une prise d'information, un système de traitement, une action et des moyens de communication pour réaliser une fonction de sécurité.

L'évaluation des performances globales d'une BIS doit porter sur l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation de la fonction de sécurité. Le fonctionnement d'un dispositif d'atténuation par rideau d'eau peut être étendu à plusieurs modes d'exploitation et à plusieurs équipements de l'installation : différents détecteurs de paramètres physiques (pression, température, débit, concentration), automates programmables, motopompes, alarmes...

Un dispositif d'atténuation par rideau d'eau peut également correspondre à une Barrière à Action Manuelle de Sécurité (BAMS) si l'opérateur est en interaction avec les éléments techniques du système de sécurité qu'il surveille ou sur lesquels il agit (par exemple, l'opérateur commande manuellement le déclenchement d'un rideau d'eau après détection d'une concentration des substances dangereuses). Un rideau d'eau peut également être considéré en tant que barrière humaine de rattrapage si la détection et la mise en œuvre sont assurées par des opérateurs.

À noter que lorsque l'action humaine se situe uniquement au niveau de l'actionneur pour commander un élément technique, la BAMS peut être considérée en tant que Mesure de Maîtrise des Risques Instrumentée (MMRI) au sens de la doctrine MMRI du 2 octobre 2013.

Les principaux référentiels applicables dans ce contexte sont :

- La méthode Ω 10 (Ineris, 2018), qui donne les éléments généraux pour l'évaluation des performances des barrières techniques de sécurité et des éléments qui les composent ;
- La méthode Ω 20 (Ineris, 2009), qui permet de caractériser les barrières humaines de sécurité et d'évaluer leur performance ;
- La Note de doctrine relative aux mesures de maîtrise des risques instrumentées (MMRI), du 2 octobre 2013, qui fixe des exigences sur la conception et l'exploitation des mesures de maîtrise des risques instrumentées de conduite (MMRIC) et de sécurité (MMRIS) ;

Il n'a pas été identifié de norme portant sur les systèmes de limitation des nuages de gaz par pulvérisation d'eau. Les normes et règles qui pourraient partiellement s'y apparenter concernent les installations de lutte contre l'incendie (NF EN 12259 ; NF EN 12094, NFPA 15, NFPA 25, APSAD R1, APSAD D2...) citées notamment dans (Ineris, 2011) et (Ineris, 2016).

Le présent document donne donc les éléments essentiels sur :

- Les principes de fonctionnement général des installations d'atténuation par rideau d'eau au chapitre 3 ;
- La vérification du respect des critères de performance tels qu'ils sont définis par la méthode Ω 10 en termes d'efficacité, de temps de réponse et de niveau de confiance au chapitre 4 ;
- La maîtrise en exploitation et le maintien dans le temps des performances des installations d'atténuation par rideau d'eau au chapitre 5.

3 Description générale

Toute installation d'atténuation par rideau d'eau comprend les éléments suivants :

- Dispositif(s) de détection automatique (détecteurs) ou humain,
- Dispositif(s) de signalisation sonore et/ou visuel,
- Dispositif de déclenchement (armoire de commande) automatique ou manuel des motopompes / compresseurs,
- Groupe motopompe(s) / compresseur(s) pour pousser l'eau vers les rampes aux pressions requises,
- Connexion à un réseau d'eau / eau additivée (réserve d'eau du site, eau du réseau pompiers, réserve d'additifs, ...),
- Rampes de buses de pulvérisation,
- ...

Ces caractéristiques correspondent à des installations fixes, mais il existe également des équipements mobiles, déployés manuellement (voir Figure 2).



Figure 2. Exemples de rideaux d'eau déployés manuellement

Cette fiche porte sur les risques liés à l'exposition à des gaz et vapeurs, aérosols liquides voire poussières toxiques, et/ou à la formation et la dérive de nuage inflammable, associés à des phénomènes dangereux de dispersion identifiés dans une étude de dangers.

Lors de la conception d'une installation d'atténuation par rideau d'eau, plusieurs éléments doivent être pris en compte, à savoir :

- La caractérisation des scénarios accidentels sur lequel intervient le dispositif de rideau d'eau (nature des substances et interactions avec l'eau, modes d'émission, causes, débit et localisation) ;
- Le dimensionnement de l'installation (position et longueurs des rampes, types de buses, espacement entre les buses, pression et débit d'eau) ;
- La disponibilité en eau du site ;
- L'environnement proche (faisabilité de l'installation en fonction des contraintes du site) ;
- La gestion de l'eau répandue (éventuellement polluée).

3.1 Atténuation d'un nuage toxique : principes

Pour les gaz, plusieurs mécanismes peuvent participer à l'atténuation de la concentration d'un nuage :

- Mécanisme dynamique (Figure 3), par déviation mécanique du nuage de gaz, entraînant vers le bas ou le haut, voire latéralement, selon l'orientation du rideau, et par dilution via un forçage de l'entraînement d'air dans le panache de gaz ;
- Mécanisme chimique, en particulier pour les gaz solubles dans l'eau, tels que l'ammoniac, le fluorure d'hydrogène, le chlorure d'hydrogène, formant respectivement de l'ammoniaque, de l'acide fluorhydrique et de l'acide chlorhydrique liquides. Le gaz est ainsi en partie absorbé par l'eau et abattu au sol ;
- Mécanisme de transfert thermique : l'apport de chaleur par contact de l'eau à température ambiante avec un gaz ou des vapeurs froides, voire les gouttelettes d'un jet diphasique, conduit à une diminution de la densité du nuage et favorise sa dilution verticale. Ce mécanisme est notamment pertinent pour des vapeurs de GNL (Rana, et al., 2010).

Pour les poussières, l'eau agit à la fois par le mécanisme dynamique d'abattage décrit ci-dessus et par mécanisme d'agrégation qui alourdit les particules, favorisant leur chute vers le sol.



Figure 3. Effet d'un rideau d'eau ascendant sur un nuage de HF – campagne expérimentale Goldfish 1986 (Koopman, 2016)

3.2 Techniques de rideaux d'eau pulvérisée

Un dispositif de rideau d'eau est constitué en bout de chaîne d'une ou plusieurs tuyauteries (« rampes ») équipées de buses de pulvérisation d'eau positionnées à intervalle régulier. L'ensemble des rejets aux buses forme un écran d'eau pulvérisée (brouillard de gouttelettes plus ou moins fines).

3.2.1 Eléments de terminologie

Il est utile de définir en préalable quelques termes techniques associés aux rideaux d'eau.

Un rideau d'eau est caractérisé par :

- son débit massique linéaire : il s'agit de la quantité d'eau injectée par unité de temps et par unité de longueur. Il dépend de la pression à la buse, du nombre de buses par mètre et d'une caractéristique de la buse qui relie son débit individuel à la pression (le « nombre d'écoulement ») ;
- son caractère ascendant ou descendant (concernant les rideaux d'eau orientés verticalement qui sont abordés dans cette fiche), selon que l'injection d'eau est assurée, respectivement, de bas en haut ou de haut en bas ;

- sa hauteur H_{wc} , c'est-à-dire la hauteur de l'écran d'eau formé entre les buses et l'extrémité des jets ;
- l'espacement E_b entre les buses d'injection.

Une buse (« d'injection » ou « d'aspersion » ou encore « de pulvérisation »), est principalement caractérisée par (voir aussi § 3.3.2) :

- un design spécifique formant des jets de différentes formes ;
- un diamètre d'orifice D_0 ;
- un nombre d'écoulement F_N (en $\text{kg/s}/\sqrt{\text{Pa}}$), qui relie son débit à la pression d'eau en amont ;
- une taille moyenne des gouttelettes qu'elle est susceptible de générer (en fonction de la pression amont, représentée typiquement par le diamètre moyen caractéristique de Sauter (SMD ou d_{32}) ;
- mais aussi un angle d'injection et un diamètre de jet pleinement développé.

Le débit massique linéaire d'un rideau d'eau peut ainsi s'écrire : $m_{l,u} = \frac{F_N}{E_b} \sqrt{\Delta P}$ (en kg/s/m)

où ΔP (en Pa) désigne la différence de pression entre l'entrée de buse (pression dans le circuit hydraulique) et la sortie de buse (pression ambiante).

3.2.2 Rideau simple

Le rideau le plus simple est constitué d'une seule rampe, équipée d'un seul type de buse d'aspersion. Classiquement, un tel rideau d'eau sera descendant (la rampe est en haut et les buses orientées vers le bas, le rideau se forme alors de haut en bas), mais il peut également être ascendant (la rampe est en bas et les buses rejettent vers le haut, le rideau se forme alors de bas en haut).

Il existe des rideaux d'eau mobiles, tels que les lances « queues de paon », qui sont susceptibles d'être mises en œuvre par des équipes d'intervention de secours, par exemple.



Figure 4. Exemples de rideaux d'eau « simples » : à gauche, rideau d'eau descendant (source : Ineris) ; à droite, lance « queue de paon » (source : IFP Training)

3.2.3 Rideau multi-buses

Il existe des rideaux plus complexes, disposant sur une même rampe de plusieurs types de buses de pulvérisation alternées. L'objectif d'un tel dispositif est d'obtenir un rideau composé de gouttelettes de tailles différentes, de vitesses voire de trajectoires différentes², afin d'améliorer son efficacité.



Figure 5. Exemple de rampe de rideau d'eau multi-buses (source DESAUTEL)

3.2.4 Rideau multi-rampes

Un rideau d'eau peut être constitué de plusieurs rampes équipées de types de buses différents et soumis à des pressions différentes, afin d'obtenir des effets complémentaires, par exemple un brouillard à très fines gouttes favorisant les échanges avec le gaz et un rideau de plus grosses gouttes imposant une dynamique de jet favorisant l'effet d'écran.

3.3 Equipements

3.3.1 Rampes

Les rampes sont les supports des buses d'aspersion. Ces dernières sont fixées aux rampes avec un espacement défini, le plus souvent régulier, et qui conditionne, en fonction du type de buse utilisé, le débit massique linéaire mais aussi taux de chevauchement des jets formant l'écran d'eau.

L'ensemble des tuyauteries et les rampes contenant l'eau d'aspersion doit être conçu pour contenir la pression interne du fluide d'aspersion et résister à la corrosion de ce fluide et de l'environnement.

Il est par exemple précisé dans la Norme NF EN ISO 20257-1 relative aux installations et équipements de gaz naturel liquéfié (installations flottantes de GNL) : « *La sélection des matériaux des tuyauteries contenant l'eau de lutte contre les incendies et des systèmes de type rideau d'eau doit permettre d'éviter toute corrosion dommageable qui remettrait en cause le bon fonctionnement des systèmes de type rideau d'eau.* ».

² Les buses peuvent avoir une orientation différente de la verticale, afin de produire un brouillard dans une direction privilégiée.

3.3.2 Types de buses

Il existe de nombreuses sortes de buses, de formes diverses et fonctionnant à des pressions variées pour former des rideaux d'eau caractérisés par un débit (dépendant du nombre d'écoulement des buses), des répartitions granulométriques, des trajectoires et des dynamiques variées. Les angles de pulvérisation sont également variables selon les modèles et les besoins.

Les différents modèles de buses permettent de produire des jets de différentes formes :

- Jets plats (Figure 6),
- Jets pleins,
- Cônes creux ou pleins (Figure 6),
- Brouillards d'eau par fragmentation des gouttelettes (brumisation) ...

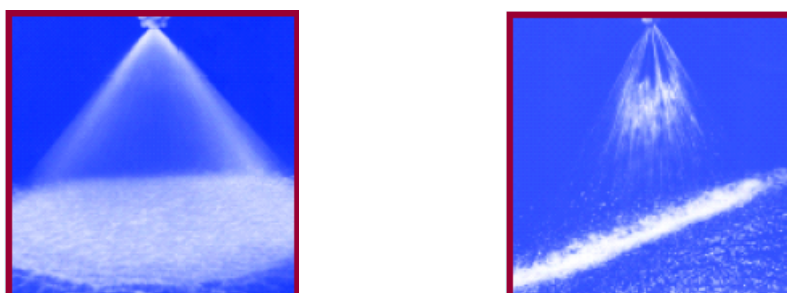


Figure 6. Exemple de formes de jet selon le type de buse : à gauche, jet conique plein ; à droite, jet plat (source : VKI)

La finesse des gouttelettes produites est représentée par le diamètre de Sauter, qui est généralement de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de μm . Il représente le rapport moyen entre le volume total du jet et la surface des gouttelettes. Il dépend de la pression d'eau, comme illustré sur la Figure 7

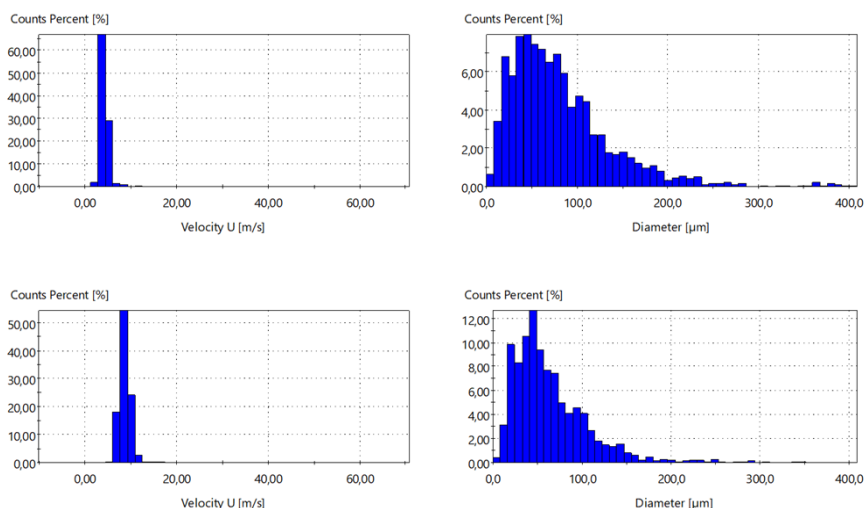


Figure 7. Exemple de mesures laser de distribution de vitesses (à gauche) et de diamètres (à gauche) de gouttes dans un jet plat généré par une même buse avec une pression d'eau de 6 bar (en haut, diamètre de Sauter = $167,5 \mu\text{m}$) et de 11 bar (en bas, diamètre de Sauter = $130,9 \mu\text{m}$) [source : PNR]

3.3.3 Pompes / surpresseurs

Selon les besoins du rideau d'eau, les niveaux de pression requis peuvent atteindre plus de 10 bar, voire plusieurs dizaines de bars, notamment pour obtenir des brouillards. La pression du réseau d'eau incendie n'est souvent pas suffisante et des dispositifs de surpression sont nécessaires pour alimenter les rampes d'aspersion.

Le nombre de pompes installées est au moins égal au nombre de pompes nécessaires pour fournir le débit requis (100 %) + 1, dans le cas où une pompe serait indisponible (pour cause de maintenance par exemple).

3.3.4 Dispositif d'évacuation/traitement des eaux

Les eaux d'aspersion sont susceptibles de capter une partie des gaz traités, en particulier si ces gaz sont solubles, et se retrouvent au sol. D'autre part, ces eaux peuvent être additivées. Il convient ainsi de prévoir des moyens de maîtriser l'écoulement de ces eaux polluées, tels que des caniveaux, des zones de rétention, des fosses déportées ... et d'anticiper les moyens de traitement de ces eaux avant rejet à l'environnement. Ce traitement peut être envisagé sur site ou sur un site externe après pompage et transport des eaux polluées.

3.4 Architecture du système

Une installation d'atténuation par rideau d'eau est une barrière instrumentée de sécurité (ou une barrière à action manuelle de sécurité) constituée de sous-systèmes de mesure, de traitement et d'actionneurs. Les conditions suivantes doivent être prises en compte :

- Les paramètres à mesurer et surveiller doivent être définis (concentration de gaz, débit, pression, vitesse, ...) ainsi que les valeurs de référence et les signaux d'entrée ou moyens de détection permettant de déclencher le dispositif ;
- La fonction pouvant éventuellement être shuntée (capteurs hors service, local en maintenance, alarme intempestive), la gestion des shunts doit être définie, en particulier par la mise en œuvre de moyens compensatoires (autres détecteurs installés temporairement, rondes de surveillance...).

3.4.1 Alimentation en eau

L'alimentation en eau est dépendante de l'alimentation électrique qui assure la mise en route des dispositifs de pompage/compression de l'eau.

Deux modes de fonctionnement peuvent être envisagés, selon les besoins en temps de réponse en fonction de la cinétique du scénario d'accident :

- Circuit hydraulique, initialement vidangé, mis en charge lors de la mise en service des pompes/compresseurs,
- Circuit hydraulique maintenu en charge, dont le déclenchement est assuré par l'ouverture d'une vanne située à proximité des rampes.

Les avantages d'un circuit maintenu en charge sont :

- De permettre le déclenchement du dispositif et l'obtention d'un rideau d'eau stabilisé plus rapidement (jets établis à leur régime permanent sans bulles d'air) ;
- D'éviter les chocs hydrauliques dans le circuit lors du remplissage brutal.

En revanche, la charge en eau permanente peut :

- Favoriser le dépôt (boues...) et la corrosion ;
- Exposer l'installation au risque de gel de l'eau dans le circuit : un dispositif de maintien hors gel doit être prévu ;
- Induire des pertes en eau conséquentes du fait d'éventuelles micro-fuites sur le circuit ;
- Présenter des incompatibilités techniques/chimiques vis-à-vis du besoin éventuel d'ajouter des additifs dans l'eau ;
- Induire un vieillissement accéléré des joints d'étanchéité de l'installation.

Il est à noter que la plupart des opérations de maintenance nécessitent la vidange du circuit.

Dans les deux cas, la perte d'énergie électrique peut conduire à la perte de la fonction de sécurité si aucune alimentation de secours n'est présente. On parle donc de dispositifs de sécurité à émission. C'est pourquoi il faut fiabiliser le circuit d'alimentation électrique en détectant la perte d'intégrité du circuit d'alimentation et en mettant en œuvre une alimentation auxiliaire de secours. Pour plus d'information, consulter la fiche « Systèmes d'alimentation de secours » disponible sur le site internet de l'Ineris³.

L'alimentation en eau et l'alimentation électrique devront être considérées comme des sous-systèmes de la barrière. L'alimentation électrique doit être surveillée et secourue pour que le système de rideau d'eau puisse être considéré comme barrière ou MMR, conformément à l'article 56 « Utilités » de l'Arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. De même, l'alimentation en eau doit être assurée indépendamment des causes de défaillance conduisant au rejet accidentel à atténuer.

3.4.2 Détection

Le fonctionnement de la barrière rideau d'eau repose d'abord sur la détection de fuite ou du dépassement d'un seuil de concentration de produit. Celle-ci peut être automatisée (chaîne de détection + alarme) ou assurée par un opérateur (détection visuelle, olfactive, sonore, ...).

S'agissant d'une détection gaz, il conviendra de se référer aux informations propres aux technologies de détection de la documentation du fournisseur. Le référentiel Ineris Ω 22 et les documents de synthèse relatifs aux barrières techniques (disponibles sur <https://www.ineris.fr/fr/base-documentaire>) apportent également des préconisations d'utilisation.

S'agissant d'une détection humaine, il conviendra d'analyser la situation / poste de travail pour s'assurer de l'adaptation à la détection par des opérateurs. Cette analyse peut être faite sur la base du référentiel Oméga 20.

3.4.3 Traitement

Les détecteurs nécessitent d'être reliés à des actionneurs via un système de traitement (une centrale gaz ou un automate). Le traitement consiste à acquérir les mesures de concentration de gaz et les comparer au seuil de déclenchement pour commander les actions associées.

3.4.4 Action

Dans le cas du dépassement du seuil d'activation, le système de rideau d'eau démarre, par le déclenchement des pompes/compresseurs qui assurent la mise en eau du circuit et l'aspersion via les buses fixées sur les rampes.

Le démarrage du rideau d'eau peut aussi être réalisé par une intervention humaine, à la suite d'une détection de fuite par ses propres moyens, ou par l'activation d'une alarme.

3.5 Modes de défaillance d'un dispositif de type « rideau d'eau »

La base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) répertorie les incidents, accidents ou presque accidents qui ont porté, ou auraient pu porter, atteinte à la santé ou la sécurité publiques ou à l'environnement.

En regardant les principales causes des accidents recensés impliquant des rideaux d'eau (notamment N° 22102 en 1979 ; N° 435 en 1988 ; N° 26186 en 1993 ; N° 36997 en 2009 ; N° 53803 en 2019 ; N° 61357 en 2023), on retrouve :

- Chute de débit du réseau d'eau interne, réduction de la pression d'eau ;
- Système non disponible par suite d'une coupure de courant ;
- Difficultés d'approvisionnement en eau ;
- Mauvaise disposition des rideaux d'eau.

³ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts-systemes-alimentation-secours-groupes>

Ce retour d'expérience montre que la performance des systèmes fixes de rideau d'eau dépend plus de leur efficacité (positionnement) et de leur disponibilité (alimentation en eau) que de leur aptitude à être tolérants aux défaillances matérielles.

En définitive, les défaillances de la fonction de sécurité (atténuation des concentrations dans un nuage de gaz) sont le plus souvent des défaillances systématiques. Les défaillances systématiques, par opposition aux défaillances aléatoires dues uniquement au matériel, sont des défaillances liées à la non-maitrise des processus mis en œuvre dans les différentes étapes du cycle de vie (spécification, conception, fabrication, installation, exploitation, maintenance).

Le Tableau 1 présente les principaux modes de défaillance des différents éléments dans un système de rideau d'eau pulvérisée. Des données quantitatives (taux de défaillance, probabilité de défaillance...) peuvent être extraites des données fournisseurs ou des bases de données de fiabilité de composants utilisés dans l'industrie, telles que l'Oreda⁴.

Des arbres de défaillances assez complets peuvent être trouvés dans (Ineris, 2000).

⁴ Le projet OREDA, *Offshore and Onshore Reliability Data*, constitue une base de données sur la fiabilité des équipements dans le domaine de l'industrie pétrolière et gazière.

Composant	Défaillance	Paramètres influant sur la fiabilité	Maintenance / Périodicité des tests
Alimentation électrique	Perte d'alimentation électrique	Présence d'un groupe électrogène ou système d'alimentation sans interruption (ASI) pour assurer l'alimentation en cas de perte de l'alimentation principale.	Pour plus d'information, consulter la fiche « Systèmes d'alimentation de secours » disponible sur le site Ineris ⁵ .
Alimentation en eau	Réserve indisponible / coupure du réseau d'eau Fuite sur le circuit	- Disponibilité effective des réserves d'eau complémentaires au réseau d'alimentation urbain. - Corrosion sur le circuit, sur les réserves. - Résistance aux contraintes liées à l'utilisation du réseau d'eau et son environnement.	Contrôle des réserves d'eau / du réseau et du circuit jusqu'aux rampes. Le réseau principal est testé tous les ans par l'exploitant.
Buses d'injection	Buses bouchées ou démontées Buses dégradées Hétérogénéité des injections => rideau défaillant Perte d'intégrité de l'écran d'eau (par vent fort, par la dynamique du jet de polluant)	- Vieillesse, rouille, poussières/impuretés dans l'eau de réserve. - Mauvais dimensionnement initial. - Utilisation de tuyauteries en acier inox. - Utilisation de buses dites « imbouchables ». - Procédure : contrôle visuel de l'aspersion. - Moyens de diagnostic : mesure de débit. - Force du vent. - Force du jet de polluant. - Distance entre la fuite et le rideau. - Choix des types de buses et de leur positionnement (agencement des buses – alternance de types ? –, vitesse et tailles de gouttes).	Utilisation de filtres en amont du réseau maillé. Utilisation sur chaque buse d'un filtre individuel, en particulier dans le cas de production de brouillards d'eau. Contrôle visuel régulier des buses. Maintenance pour prévenir le bouchage des buses.
Détecteur de gaz	Dérive de mesure, perte de mesure	- Technologie de détection de gaz. - Positionnement et nombre de détecteurs (maillage). - Tolérance aux défaillances (redondance). - Détection des défaillances (autodiagnostic). - REX sur son implantation (si disponible).	Entre 3 mois et 1 an suivant la technologie des détecteurs.

⁵ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts-systemes-alimentation-secours-groupes>

Composant	Défaillance	Paramètres influant sur la fiabilité	Maintenance / Périodicité des tests
Automate	Défaillances matérielles, défaut d'acquisition, défaut de traitement ou défaut d'activation des sorties	- Tolérance aux défaillances (redondance). - Moyens de diagnostics des défauts. - Logiciel applicatif développé et validé dans les règles de l'art.⁶ - Certification SIL (si disponible). - Utilisation d'une centrale de type DECT (Dispositif Electrique automatique de Commande et de Temporisation) certifié selon la norme NF EN 12094-1 (AFNOR, 2003) pour la sécurité incendie, adaptée aux besoins spécifiques liés à l'objectif d'abattage de gaz toxique (détection gaz, temporisation...).	Le maintien des performances doit être assuré par la mise en œuvre de procédures permettant de suivre et de valider les évolutions (gestion des modifications et de configuration), la réalisation de tests périodiques, la gestion de la pérennité de l'application et la gestion de la mise hors service (bypass / shunt).
Relais	Contact collé, circuit ouvert.	- Dimensionnement. - Redondance. - Certification SIL (si disponible).	Annuel pour coupure énergie. Mensuel pour motopompes/surpresseurs.
Motopompes, surpresseurs	Défaillance électrique (moteur, disjoncteur, variateur, ...). Défaillance mécanique.	- Technologie des pompes ou surpresseurs (conformité aux normes NF EN 12845, NFPA 20, ...). - Redondance / équipement de secours.	Au minimum une fois par an, suivant la criticité de l'application.

Tableau 1 : Modes de défaillance de la barrière rideau d'eau

⁶ <https://www.ineris.fr/fr/guide-inspection-logiciels-applicatifs-principes-mise-oeuvre>

4 Critères d'évaluation des performances

Une installation d'atténuation par rideau d'eau permet de réaliser une fonction de sécurité. Cette fonction nécessite la mise en œuvre de capteurs, de moyens de traitement et communication et d'actionneurs ou d'actions humaines pour être réalisée. La barrière à évaluer sera donc généralement une fonction instrumentée de sécurité comprenant tous ces composants.

L'évaluation de la performance d'une installation d'atténuation par rideau d'eau repose sur l'adaptation de l'installation au contexte d'utilisation (caractéristiques de la substance dangereuse, besoins d'extraction, positionnement des points de captage, dimensionnement des tuyauteries) et le suivi du maintien dans le temps.

Les éléments repris, ci-dessous, concernent l'évaluation de l'indépendance, l'efficacité, le temps de réponse et le niveau de confiance de cette barrière.

4.1 Indépendance

On cherche à justifier l'indépendance entre l'installation d'atténuation par rideau d'eau et les scénarios sur lesquels elle intervient. Pour cela, il faut s'assurer :

- Qu'une défaillance du rideau d'eau ne peut pas être la cause du scénario. La défaillance du rideau d'eau ne peut pas être la cause du scénario « dispersion aérienne accidentelle de produits toxiques » :
 - o En cas de non-activation sur sollicitation ou lors d'une ouverture inopinée du rideau d'eau, le scénario accidentel n'est pas déclenché.
- Que le scénario accidentel n'est pas à l'origine d'une défaillance de l'installation d'atténuation par rideau d'eau. La performance du rideau d'eau ne doit pas être dégradée par l'occurrence des événements initiateurs ;
 - o Si le rideau d'eau est correctement dimensionné et conçu pour être adapté dans son contexte d'utilisation, les facteurs susceptibles de provoquer une dispersion de produits toxiques ne devraient pas dégrader son fonctionnement, par exemple un endommagement de l'équipement par effet de surpression ou de projection provoqué par l'éclatement d'une capacité contenant le gaz toxique ;
 - o Une attention particulière doit être portée aux circuits d'approvisionnement en eau.

4.2 Efficacité

L'efficacité d'un rideau d'eau est sa capacité à atténuer la concentration d'un nuage de gaz toxique entre l'amont et l'aval du rideau.

Une barrière de sécurité peut ne pas être efficace à 100 % ; elle sera alors retenue comme barrière de sécurité mais l'intensité du phénomène dangereux associé au fonctionnement de la barrière est alors évaluée en tenant compte de l'efficacité réelle de la barrière.

Ainsi, une installation d'atténuation par rideau d'eau correctement dimensionnée permettra d'abattre un nuage de X %. Le rideau d'eau peut être retenu comme barrière mais le phénomène dangereux associé à son bon fonctionnement fait intervenir la part du nuage non abattu, soit (100-X) %.

Le taux d'efficacité φ d'un rideau d'eau (en %) peut s'exprimer mathématiquement par l'expression :

$$\varphi = \frac{C_{inactif} - C_{actif}}{C_{inactif}} \times 100$$

où

$C_{inactif}$ est la concentration de gaz moyenne en aval du rideau d'eau inactif,

C_{actif} est la concentration de gaz en aval du rideau d'eau actif.

Cette efficacité peut aussi s'exprimer par le facteur de dilution D_f :

$$D_f = \frac{C_{inactif}}{C_{actif}}$$

La relation entre φ à D_f s'écrit alors :

$$D_f = \frac{100}{100 - \varphi} ; \quad \varphi = \frac{D_f - 1}{D_f} \times 100$$

Comme évoqué précédemment, l'efficacité d'abattage / de dilution / d'absorption dépend d'abord de la nature du fluide à traiter, selon qu'il est gazeux ou en gouttelettes, lourd ou léger, soluble dans l'eau, froid ou non relativement à l'eau injectée. L'efficacité dépend également de la dynamique d'interaction entre l'eau et le gaz.

Pour un gaz donné, il est courant d'exprimer l'efficacité en fonction du ratio [débit massique d'eau / débit massique de gaz] : typiquement, l'efficacité augmente quand le débit d'eau augmente par rapport au débit de gaz.

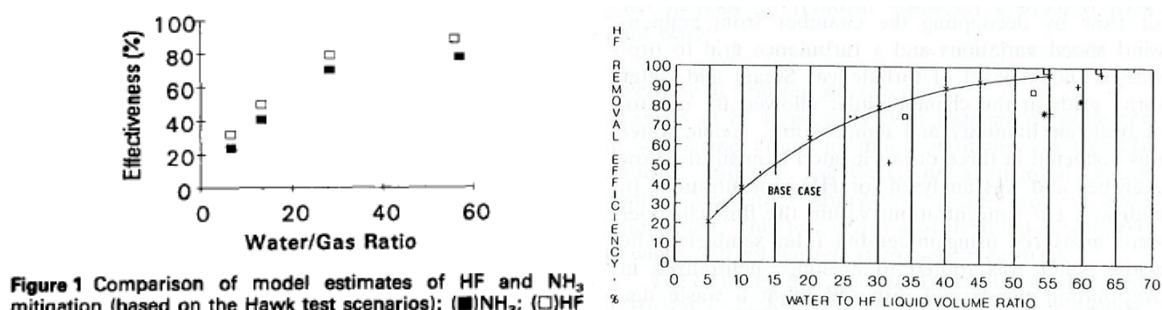


Figure 8. Exemples d'évolution de l'efficacité d'un rideau d'eau sur un nuage de gaz : à gauche, ammoniac et acide fluorhydrique, selon une approche de modélisation (Fthenakis, et al., 1995) ; à droite, acide fluorhydrique, selon une approche expérimentale (Diener, 1991)

Cependant, l'efficacité du rideau d'eau dépend d'autres paramètres qu'il convient également de prendre en compte : dynamique relative des flux de gaz et d'eau, forme des jets d'eau, tailles de gouttes, températures relatives eau/gaz, ...

Ainsi, l'efficacité d'un rideau d'eau augmente notamment avec :

- L'augmentation du ratio [débit massique d'eau / débit massique de gaz] ;
- L'augmentation du ratio [quantité de mouvement de l'eau / quantité de mouvement du gaz].

L'influence des principaux paramètres qui modifient l'efficacité est décrite ci-après.

Position du rideau d'eau par rapport à la source d'émission du gaz

La distance entre le rideau d'eau et la source d'émission du gaz toxique est un facteur-clé. En effet :

- cette distance conditionne la largeur et la hauteur de rideau nécessaire à atténuer le nuage, qui devient plus large et plus haut en se dispersant et risque de passer à côté de la barrière si celle-ci n'est pas bien dimensionnée ;
- le rideau d'eau est généralement plus efficace à réduire les fortes concentrations que les concentrations plus faibles ;
- en revanche, le ratio des quantités de mouvement est plutôt défavorable à l'efficacité en champ proche, en particulier si la vitesse d'émission de gaz est élevée (voir le paragraphe relatif au paramètre 'Rapport des quantités de mouvement').

Tailles de gouttes et solubilité du gaz

Un rideau d'eau n'a pas la même efficacité suivant que le gaz est soluble dans l'eau ou non :

- S'il n'est pas ou peu soluble, l'effet principal est mécanique (dilution par entraînement d'air) ;
- S'il est soluble ou réactif, l'effet principal du rideau est physico-chimique (absorption, réaction chimique).

Dans le premier cas, c'est la dynamique d'entraînement d'air par les gouttes qui augmente la dilution. Il est alors préférable d'opter pour une pulvérisation générant de grosses gouttes qui favorisent cet entraînement d'air et maintiennent une bonne tenue au vent, pour assurer un effet d'écran satisfaisant.

Dans le second cas, la finesse des gouttelettes favorise les échanges entre le gaz et l'eau donc l'absorption, du fait de l'augmentation des surfaces de contact et des temps d'interaction gaz/eau (Buchlin, 1994). Cependant, des gouttes très fines sont moins rapides et plus facilement entraînées par le flux d'air et de gaz : la tenue au vent est moins bonne et l'effet de dilution par entraînement d'air est moindre que pour une granulométrie plus grossière.

Selon les besoins, il convient ainsi choisir des types de buses et des configurations qui produisent un mélange de petites gouttelettes et grosses gouttelettes qui soit optimisé pour assurer l'efficacité d'atténuation.

Si un rejet de gaz soluble s'apparente plutôt à une fuite de faible vitesse qu'à un jet puissant, ou se situe dans un espace confiné, il est préférable de placer le rideau d'eau au plus près de la source pour favoriser l'efficacité d'absorption.

Espacement entre les buses

Il convient de s'assurer que l'espacement entre les buses conduit à un recouvrement partiel suffisant des jets voisins pour réduire l'espace libre entre deux jets (à proximité des buses), où le gaz pourrait traverser le rideau sans être affecté. Un chevauchement excessif des jets peut en revanche s'avérer inefficace (Schoten, et al., 2000).

L'espacement optimal entre les buses dépend notamment des types de buses employés.

Effet thermique

Par ailleurs, un effet thermique lié à l'apport de chaleur par l'eau peut intervenir favorablement si le gaz présente une différence de température significative avec la température ambiante lorsqu'il entre en contact avec le rideau d'eau. C'est notamment le cas pour des vapeurs de GNL, qui sont lourdes lorsqu'elles sont émises car elles sont très froides, et s'allègent progressivement lorsqu'elles sont réchauffées dans l'air ambiant et encore plus si le réchauffement est forcé par un rideau d'eau (Rana, et al., 2010) (Kim, et al., 2012).

Dans certains cas, cet effet thermique participe favorablement à la dispersion des vapeurs mais il reste a priori marginal dans l'efficacité d'un rideau d'eau.

Orientation du rideau d'eau (ascendant ou descendant)

Il a été montré expérimentalement que l'hydrodynamique très différente d'un rideau d'eau ascendant par rapport à un rideau d'eau descendant conduit à des modes d'action différents : zones de recirculation et de dilution plutôt en amont pour un rideau descendant, plutôt en aval pour un rideau ascendant, diffusion verticale du nuage de gaz... (Moodie, 1985), (Dimbour, et al., 2003).

Pour les vapeurs de GNL, par exemple, un rideau d'eau ascendant semble plus efficace qu'un descendant sur ce type de gaz, en favorisant la diffusion verticale des vapeurs allégées (Rana, et al., 2010).

Rapport des quantités de mouvement

Concernant le rapport des quantités de mouvement évoqué précédemment, (Hald, et al., 2005) ont montré que ce ratio est un facteur déterminant de l'efficacité d'un rideau d'eau, en particulier lorsque le mode d'action est mécanique (dilution de gaz peu solubles, tels que le chlore ou le CO₂, par exemple). Le ratio des quantités de mouvement peut s'exprimer ainsi :

$$R_m = \frac{\dot{m}_{l,u} U_{d0}}{\rho V^2 H_{wc}}$$

où :

$\dot{m}_{l,u}$ [kg/s/m] est le débit massique linéaire d'eau,

U_{d0} [m/s] est la vitesse initiale des gouttelettes d'eau,

ρ [kg/m³] est la masse volumique du nuage,

V [m/s] est la vitesse du vent environnant / la vitesse incidente du gaz,

H_{wc} [m] est la hauteur du rideau d'eau.

Pour les faibles valeurs de R_m , le panache de gaz est plus susceptible de « transpercer » le rideau d'eau, dégradant ainsi fortement l'efficacité, et le vent plus susceptible de perturber le rideau d'eau, qui perd en efficacité d'abattage. (Buchlin, 2017) relate une efficacité croissante de la dilution lorsque R_m augmente, sur des tests expérimentaux et numériques d'interaction de panache de gaz non réactif dense (CO₂, SF₆, N₂ et Cl₂) avec un rideau d'eau descendant (Figure 9).

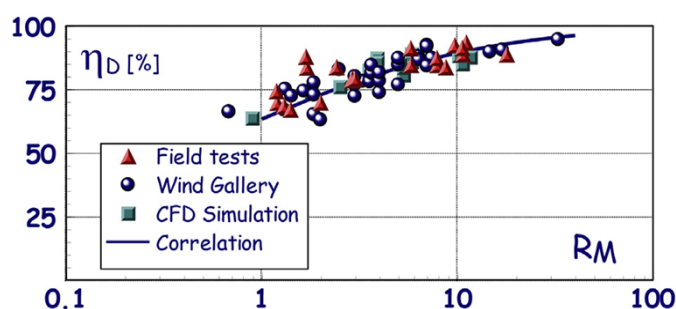


Figure 9. Exemple de graphe d'efficacité (noté η_D) d'un rideau d'eau en fonction du ratio R_m , extrait de (Buchlin, 2017)

Une valeur de R_m supérieur à 5, voire 10, est préconisée (Hald, et al., 2005), (Buchlin, 2017).

D'autres solutions que l'eau pure

L'ajout d'un additif dans l'eau d'aspersion peut être envisagé pour favoriser l'absorption de gaz, par exemple au moyen d'une solution de soude pour un nuage de chlore (Palazzi, et al., 2007), ou encore au moyen de sels inorganiques et des agents tensio-actifs pour améliorer l'absorption de l'ammoniac (Hua, et al., 2018).

Influence du vent

En milieu ouvert (plein air), les conditions météorologiques (le vent, l'humidité ambiante) peuvent avoir une influence sur l'efficacité. (Buchlin, 2017) identifie qu'au-delà d'un vent de 5 m/s, l'emploi d'un rideau d'eau comme mesure de mitigation devient discutable, du fait d'une efficacité attendue très faible. Il montre cependant aussi que le rideau d'eau sera d'autant moins sensible au vent que les gouttes le composant seront grosses. La mise en œuvre de rideaux d'eau multi-buses / multi-rampes est une option à explorer dans de telles conditions.

(Schoten, et al., 2000) suggèrent qu'en cas de fort vent, un rideau orienté vers le haut serait généralement plus efficace à diluer le nuage de gaz qu'un rideau orienté vers le bas, ce dernier risquant de laisser passer le nuage de gaz sous lui près du sol.

Pour un rideau descendant, la sensibilité au vent sera d'autant plus faible que le rideau sera de faible hauteur.

Ajout de barrières physiques

Il peut parfois être approprié d'associer au rideau d'eau un obstacle tel qu'un mur en aval de celui-ci (Figure 10), pour freiner le gaz – notamment casser une dynamique de jet – et favoriser ainsi les interactions entre le gaz et l'eau. En cas de vent, ce type de dispositif peut ainsi améliorer l'efficacité du rideau d'eau.

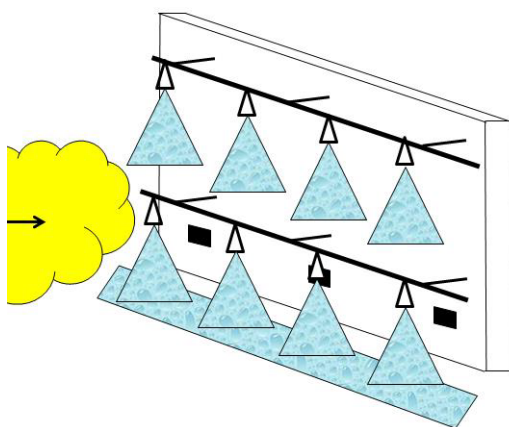


Figure 10. Association d'un mur et d'un rideau d'eau, pour améliorer l'efficacité de ce dernier

Dans une configuration de rideau d'eau ascendant, afin d'éviter que du gaz rampant au sol passe dans les interstices entre les injecteurs sans rencontrer le rideau, il a été démontré expérimentalement que l'adjonction d'un muret bas derrière les buses de pulvérisation était efficace, afin d'imposer au gaz un mouvement de franchissement favorisant les interactions avec le rideau d'eau (Figure 10).

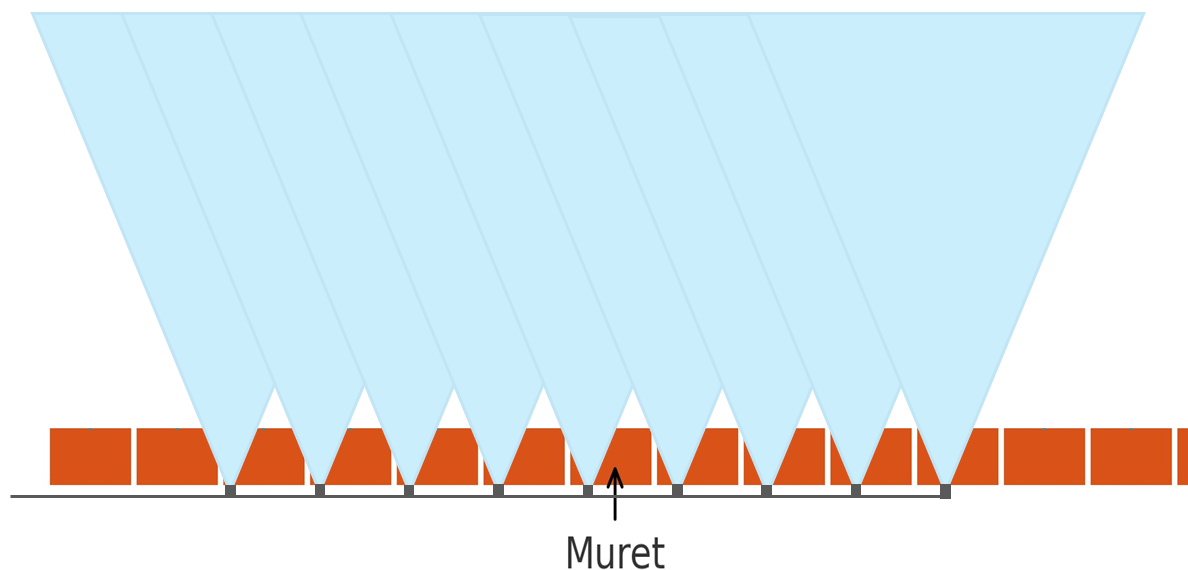


Figure 11. Illustration d'un dispositif favorisant les interactions gaz/rideau d'eau ascendant

Efficacité localisée

Dans certaines configurations, le rideau peut agir comme un obstacle physique, qui s'oppose au passage du gaz et atténue très fortement les concentrations en aval, sur une distance toutefois limitée (que l'on peut rattacher à la zone de « sillage ») au-delà de laquelle l'effet du rideau d'eau n'est pratiquement plus sensible (Ineris, 2015), (Dimbour, et al., 2003).

Il est à signaler qu'en amont du rideau, la concentration de gaz pourrait être augmentée par rapport à la concentration observée en l'absence du rideau, ou au contraire être diminuée, selon les mouvements de recirculation provoqués par la dynamique du rideau. Pour un nuage constitué de particules solides, un effet d'accroissement de la concentration en particules pourrait advenir localement en amont du rideau.

Conclusion sur l'efficacité

Nombreux sont les paramètres à prendre en compte dans l'évaluation de l'efficacité d'un rideau d'eau. Au-delà de quelques diagrammes issus de sources bibliographiques permettant d'estimer un ordre de grandeur du ratio de débits eau / gaz pour atteindre un certain niveau d'efficacité d'abattage de certains gaz (HF, ammoniac, ...), et de l'analyse évoquée plus haut concernant le ratio des quantités de mouvement, la modélisation numérique, sur la base d'essais expérimentaux, permet de disposer d'outils d'aide au dimensionnement des rideaux d'eau, pour caractériser les débits, vitesse, diamètre de buses (en lien avec les tailles des gouttes), hauteur de rideau, ... afin d'optimiser les configurations pour atteindre un objectif d'atténuation (HGSPRAY (Fthenakis, 1993), CASIMIRE (Hald, et al., 2005) (Buchlin, 2017), ...).

Il existe également des corrélations simples pour estimer l'efficacité d'un rideau d'eau. (Moore, et al., 1981) ont proposé un modèle semi-empirique simplifié divisant le problème en trois zones de dispersion (amont du rideau, passage du rideau et aval du rideau), qui a inspiré d'autres auteurs, par exemple (Dandrieux-Bony, et al., 2005). (Hald, 2005) propose également une corrélation dans le même esprit, basée sur le ratio R_M , de la forme $FD = (1 + C\sqrt{R_M})^2$, où FD est le coefficient de dilution, relié au taux d'efficacité φ défini précédemment dans le rapport par l'expression $\varphi = 1 - 1/FD$, et C une constante de calibrage. L'application de telles formules semi-empiriques implique de s'assurer que les configurations de rideaux d'eau sont suffisamment proches des essais ayant permis de les établir, car plusieurs paramètres potentiellement influents ne figurent pas dans ces modèles simplifiés (tailles de gouttes, hauteur du rideau...).

L'emploi de codes numériques de type CFD, dans lesquels il existe souvent des modèles de pulvérisation d'eau, peut aussi apporter des éléments qualitatifs précieux pour le dimensionnement de telles installations (Chao, et al., 2014) (Min, et al., 2020).

4.3 Temps de réponse

Le temps de réponse de l'installation d'atténuation par rideau d'eau correspond à l'intervalle de temps entre l'occurrence de la fuite, le démarrage de l'aspersion et l'établissement du ratio [débit massique d'eau / débit massique de gaz]. Le temps de réponse est donc dépendant :

- Du délai de détection, qui dépend bien sûr de la mise en œuvre d'une technologie de capteur adaptée au gaz à détecter, mais surtout du positionnement des détecteurs (nombre et emplacement adaptés aux fuites à détecter) ;
- Du délai d'ouverture des vannes (consulter la fiche « Vannes industrielles de sécurité », disponible sur le site Ineris⁷) ;
- Du délai de déclenchement des pompes/surpresseurs ;
- Du délai de mise en eau des rampes jusqu'aux buses, qui dépend des conditions du système au repos, selon qu'il soit vidangé ou qu'il soit en charge.

⁷ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-vannes-industrielles-securite>

Le délai de mise en pression d'un circuit vidangé dépend des longueurs de tuyauteries, diamètres, singularités, ... Il peut être de plusieurs dizaines de secondes.

4.4 Niveau de confiance

Afin de déterminer le niveau de confiance global de la chaîne, il convient d'analyser chacun des éléments qui la constituent de manière séparée.

- Alimentation en eau : surveillance pour garantir des réserves d'eau suffisantes (niveau, débit).
A titre d'exemple, la norme NFPA 25 recommande pour les réserves incendie :
 - o S'il y en a un, une vérification du capteur de niveau d'eau dans les réservoirs tous les trois mois.
 - o S'il n'y a pas de capteur de niveau, alors une vérification tous les mois du niveau d'eau.
- Alimentation électrique : comme il s'agit d'un dispositif de sécurité à émission, l'alimentation devra alors être étudiée comme un sous-système de la barrière avec une évaluation du NC associé. Pour pouvoir retenir le rideau d'eau comme une barrière, il faut respecter les exigences suivantes :
 - o La perte d'intégrité de circuit est détectée (par exemple, surveillance de bout de ligne) ;
 - o L'intégrité de l'alimentation en énergie est assurée, en utilisant une alimentation auxiliaire (par exemple, groupe diesel, batterie de secours, ...). Pour plus d'information, consulter la fiche « Systèmes d'alimentation de secours (Groupes Électrogènes et Alimentation Sans Interruption) » disponible sur le site Ineris⁸.
- Capteurs : la défaillance ou dérive d'un détecteur de gaz peut provoquer la non-détection de la présence de gaz et en conséquence la perte de la fonction de sécurité. Les détecteurs de gaz doivent être connectés à leurs unités de commande respectives, comme spécifié par le constructeur (en observant la résistance maximale de boucle, la taille minimale des fils, l'isolation, etc.) et utiliser un système de câble, de fils et de conduits adaptés et approuvés pour l'application, le classement ATEX de l'emplacement et une protection mécanique correcte. Pour plus de détails, consulter le « Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de l'usage des détecteurs de gaz ponctuels fixes » disponible sur le site Ineris⁹.
- Traitement : En général, on utilise une centrale de détection gaz, un Dispositif Electrique automatique de Commande et de Temporisation (DECT) pour la gestion des systèmes d'extinction incendie ou un automate de sécurité. En cas de présence de gaz, la centrale de détection gaz, le DECT ou l'automate de sécurité réaliseront les actions préalablement définies comme une signalisation sonore et/ou lumineuse, le démarrage des ventilateurs, la mise à l'arrêt en sécurité des installations (coupure électrique générale, fermeture des vannes automatiques d'isolement des circuits), report d'alarme sur téléphone personnel d'astreinte.
- Action : le système fixe de rideau d'eau fonctionne à la sollicitation. Son niveau de confiance est lié à la probabilité que ce système ne permette pas de former un rideau d'eau tel que conçu pour atténuer les concentrations d'un nuage de gaz toxique ou inflammable dans l'air.

Au regard des données de fiabilité, et étant un système à émission (nécessite de l'énergie pour réaliser la fonction de sécurité) et non tolérant aux défaillances (système non redondant), l'Ineris propose de retenir un NC = 1 suivant l'architecture et les choix de composants et sous réserve que le système de rideau d'eau soit correctement dimensionné, construit, installé et maintenu dans le temps.

Dans le cas où une intervention humaine est requise, seul un NC = 1 pourrait être valorisé, sous réserve du respect des critères listés ci-dessus.

⁸ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts-systemes-alimentation-secours-groupes>

⁹ <https://www.ineris.fr/fr/guide-bonnes-pratiques-maitrise-usage-detecteurs-gaz-ponctuels-fixes>

Sur certaines applications, un NC = 2 peut être valorisé si, en plus de la justification du dimensionnement et positionnement adaptés, une étude est réalisée portant notamment sur une identification exhaustive des possibles causes et modes de défaillance des éléments de l'installation et la mise en œuvre des mesures de contrôle et procédures d'exploitation adaptés pour maîtriser ces modes de défaillance.

Il est également possible de justifier un NC = 2 à partir d'une évaluation basée sur un retour d'expérience quantifié (notion de « validé par l'usage » définie dans le référentiel Ω 10) pour des installations similaires et dans des conditions d'utilisation équivalentes à celles du site où le dispositif est mis en œuvre (contexte et historique d'utilisation, maintenance, organisation, etc.).

5 Tests et maintenance

Le maintien des performances doit être assuré par la mise en œuvre de tests périodiques et procédures permettant de suivre et de valider les évolutions.

Il est important de contrôler l'ensemble du système de sécurité, c'est-à-dire les circuits d'alimentation, de circulation de l'information, les automates asservis, les voyants et alarmes ainsi que les actionneurs.

5.1 Tests périodiques et maintenance

Des essais doivent être réalisés pour démontrer que le système est adapté aux conditions environnementales dans lesquelles le matériel est installé et qu'il peut garantir la sécurité de l'installation industrielle.

Toutes les observations et les résultats de mesure doivent être documentés. Ces tests peuvent comprendre :

- Contrôle du niveau d'eau dans les réserves (si l'eau provient de réserves d'eau sur site) ;
- Test de démarrage des groupes de pompage ;
- Contrôle visuel de l'état de corrosion du réseau ;
- Vérification des buses (risque de bouchage) ;
- Vérification de l'état des filtres (si l'eau provient de réserves d'eau sur site, notamment).

Il pourra être pris comme référence les éléments fournis dans la fiche barrière « Moyens fixes de lutte contre l'incendie – Stockages de liquides inflammables et de gaz inflammables liquéfiés » disponible sur le site Ineris¹⁰, qui renvoie à l'arrêté du 03 octobre 2010 modifié et à la norme NFPA 20 (National Fire Protection Association / CNPP, 2017), les équipements étant très similaires à ceux exploités pour un réseau de lutte contre l'incendie, en dehors des aspects de protection contre les effets thermiques d'un feu à proximité.

Ces tests périodiques, réalisés au moins une fois par an conformément à la réglementation française (arrêté du 03/10/2010 modifié), visent à vérifier le bon état de fonctionnement du réseau et de la pomperie. La norme NF EN 13565-2 précise d'autres points d'inspection à contrôler de façon hebdomadaire, mensuelle, semestrielle ou annuelle par du personnel qualifié, par exemple en ce qui concerne les dispositifs d'alarme, de report d'alarme et de démarrage manuel ou automatique des pompes.

La norme NFPA 25 dédiée à la maintenance des systèmes de lutte contre l'incendie à base d'eau (National Fire Protection Association / CNPP, 2010) peut également apporter des éléments relatifs à la périodicité des tests et actions de maintenance du réseau d'eau jusqu'aux buses de pulvérisation. Il en ressort notamment une fréquence minimale annuelle d'inspection de l'installation, et après chaque déclenchement.

La périodicité des essais des autres éléments est fixée par le fabricant, en tenant notamment compte des contraintes du procédé et de l'environnement.

Idéalement, un test complet de la barrière doit être réalisé (alimentation, détection, traitement, action). Si un test complet n'est pas possible, des tests partiels peuvent être effectués. Dans ce cas, il convient de s'assurer que l'ensemble des tests réalisés couvre l'intégralité des éléments.

¹⁰ <https://www.ineris.fr/fr/document-synthese-relatif-barriere-technique-securite-bts-moyens-fixes-lutte-contre-incendie>

5.2 Gestion des modifications

La gestion des modifications portant sur les systèmes fixes de rideau d'eau ou leur environnement d'utilisation revêt un caractère particulièrement important en matière de sécurité fonctionnelle.

Toute modification de l'installation industrielle ou des paramètres associés au rideau d'eau ou du matériel doit faire partie d'un processus spécifique de gestion de modification pour veiller à ne pas dégrader l'efficacité et le temps de réponse. Une demande de modification doit être émise au service compétent. Une analyse doit être faite pour identifier les impacts possibles. Une fois les impacts identifiés et la modification acceptée, une opération de validation doit être réalisée.

En fonction de la phase du cycle de vie, la responsabilité du suivi de ces modifications peut être transférée du concepteur à l'utilisateur. L'objectif est de s'assurer que les modifications sont correctement revues et approuvées de manière à s'assurer que l'intégrité de sécurité prescrite est maintenue.

6 Liste des sources utilisées

AFNOR. 2003. *Installations fixes de lutte contre l'incendie - Éléments constitutifs pour installations d'extinction à gaz - Partie 1 : exigences et méthodes d'essai pour les dispositifs électriques automatiques de commande et de temporisation*. s.l. : AFNOR, 2003.

Buchlin, J.-M. 2017. Mitigation of industrial hazards by water spray curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017, Vol. 50.

—. 1994. Mitigation of problem clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1994, Vol. 7, 2.

Chao, C., Tan, W. et Liu, L. 2014. Numerical simulation of water curtain application for ammonia release dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014, Vol. 30.

Dandrieux-Bony, A., Dimbour, J. P. et Dusserre, G. 2005. A simple model for calculating chlorine concentrations behind a water spray in case of small releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2005, Vol. 18, 4-6.

Diener, R. 1991. Mitigation of HF releases. *J. Loss Prev. Process Ind.* 1991, Vol. 4.

Dimbour, J.-P., Dandrieux, A. et Dusserre, G. 2003. The use of water sprays for mitigating chlorine gaseous releases escaping from a storage shed. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003, Vol. 16, 4.

Fthenakis, V. M. et Blewitt, D. N. 1995. Recent developments in modelling mitigation of accidental releases of hazardous gases. *J. Loss Prev. Process Ind.* 1995, Vol. 8.

Fthenakis, V. M. 1993. HGSPRAY: A complete model of spraying unconfined gaseous releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1993, Vol. 6, 5.

Hald, K. 2005. Forced dispersion of heavy gas clouds by water curtains - Experimental and numerical approaches. *Mémoire de thèse*. s.l. : Ecole doctorale de Saint-Etienne, 2005.

Hald, Karin, et al. 2005. Heavy gas dispersion by water spray curtains: a research methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2005, Vol. 18.

Hua, M., et al. 2018. Protective water curtain ammonia absorption efficiency enhancement by inorganic and surfactant additives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, Vol. 116.

Ineris. 2011. *Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.) - Sprinkleur*. 2011. DRA-11-117743-13772A.

—. 2015. *Éléments d'appréciation de l'efficacité d'un rideau d'eau à atténuer la concentration d'un rejet toxique*. 2015. DRA-15-141600-00314A.

—. 2016. *Moyens fixes de lutte contre l'incendie – Stockages de liquides inflammables et de gaz inflammables liquéfiés*. 2016. DRA-16-156884-04985B.

—. 2018. *Omega 10 – Evaluation de la performance des Barrières Techniques de Sécurité*. 2018. DRA-17-164432-10199B.

—. 2009. *Omega 20 – Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité*. 2009. DRA-09-103041-06026B.

—. 2000. *Prise en compte des rideaux d'eau pulvérisée fixes dans les démarches d'analyse des risques*. 2000.

Kim, B. K., Mentzer, R. A. et Sam Mannan, M. 2012. Modeling of Water-Spray Application in the Forced Dispersion of LNG Vapor Cloud Using a Combined Eulerian-Lagrangian Approach. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, Vol. 51.

Min, D. S., et al. 2020. Numerical modelling for effect of water curtain in mitigating toxic. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020, Vol. 63.

Moodie, K. 1985. The use of water spray barriers to disperse spills of heavy gases - The performance characteristics of full-scale water-spray barriers when dispersing accidental spills of heavy gases. *Plant/Operations Progress*. 1985, Vol. 4, 4.

Moore, P. A. C. et Rees, W. D. 1981. Forced dispersion of gases by water and steam. *North Western Branch Papers, Institution of chemical engineers*. 1981, Vol. 5.

National Fire Protection Association / CNPP. 2010. *NFPA 20 - Installation de pompes fixes contre l'incendie*. 2010.

—. 2017. *NFPA 25 - Norme relative au contrôle, à l'essai et à la maintenance des systèmes de protection contre l'incendie à base d'eau*. 2017.

Palazzi, E., Currò, F. et Fabiano, B. 2007. n-Compartment mathematical model for transient evaluation of fluid curtains in mitigating chlorine releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007, Vol. 20, 2.

Rana, M. A. et Sam Mannan, M. 2010. Forced dispersion of LNG vapor with water curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010, Vol. 23, 6.

Schoten, H. H., et al. 2000. The use of fluid curtains for post-release mitigation of gas dispersion. *ICHEME Symposium series*. 2000, 147.

