



Date : 26 septembre 2024

Suivi par Valentin DÉNIEL

## Rapport d'études d'évaluation des risques - Électrolyseur d'hydrogène -

**SOCOTEC Environnement**  
**AXE – Pôle d'Expertise Réglementaire**  
1 Rue Siméon Poisson - Campus de Ker Lann  
35170 BRUZ  
Tél. : 02 99 52 52 12

Mission	Rapport d'évaluation des risques
Domaine d'activité	Production d'hydrogène
Version	B
Interlocuteur	Valentin DÉNIEL – Chargé d'affaires Risques Industriels & Sûreté
Date	Septembre 2024

Travail	Nom	Qualité	Date
Rédaction	Valentin DÉNIEL	Chargé d'affaires Risques Industriels & Sûreté	Septembre 2024

# SOMMAIRE

1. Objectifs.....	2
2. Scénarii d'accident identifiés .....	3
3. Méthodologie .....	4
3.1. Valeurs des seuils de référence .....	4
3.1.1. Seuils des effets thermiques.....	4
3.1.2. Seuils des effets de surpression .....	5
3.1.3. Seuils d'effets d'hyperoxie .....	5
3.1.4. Projections brûlantes.....	5
3.2. Méthodologie de calcul .....	6
3.2.1. Feu de nuage.....	6
3.2.2. UVCE .....	6
3.2.3. Feu torche.....	8
3.2.4. Explosion pneumatique de capacité.....	10
3.2.5. Dispersion atmosphérique.....	11
3.2.6. Projections brûlantes.....	12
4. Modélisations.....	13
4.1. Perte de confinement en sortie de la cathode – Feu torche et UVCE d'hydrogène / Projections brûlantes .....	13
4.2. Perte de confinement en sortie de l'anode – Hyperoxie et projections brûlantes.....	15
4.3. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'oxygène - Hyperoxie .....	17
4.4. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'hydrogène (ligne 6'') – Feu torche et UVCE d'hydrogène .....	18
4.5. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'hydrogène (ligne 2'') – Feu torche et UVCE d'hydrogène .....	20
4.6. Explosion pneumatique du séparateur O <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> .....	22
4.7. Rejet à l'évent H <sub>2</sub> – Feu torche et UVCE d'hydrogène .....	23
4.8. Rejet à l'évent O <sub>2</sub> – Hyperoxie.....	25
5. Conclusion.....	26

# 1. Objectifs

---

La présente étude a pour objectif d'évaluer les conséquences de scénarii d'accident susceptibles d'être associés à une installation de production d'hydrogène (H<sub>2</sub>) par électrolyse, correspondant à un skid modulable, employé pour la fourniture d'hydrogène auprès de différents secteurs industriels. Plus particulièrement, l'étude se concentre sur l'électrolyseur d'hydrogène et l'unité de transformation et rectification (refroidissement / séparation).

La présente étude se base sur les scénarii d'accident déjà identifiés préalablement, à l'aide d'analyses de risques ou sur la base de retour d'expérience sur des installations similaires. L'étude n'a pas vocation à identifier les potentiels scénarii d'accident majeur susceptibles d'être associés au fonctionnement de l'électrolyseur d'hydrogène.

Pour chacun des scénarii d'accident, un ou plusieurs phénomènes dangereux sont identifiés ; l'intensité des effets de ces phénomènes est ainsi évaluée au sein de l'étude, à l'aide de modélisations des phénomènes dangereux, sur la base des bonnes pratiques méthodologiques et réglementaires applicables en France.

L'objectif de la présente étude est ainsi de déterminer les distances d'effets des différents phénomènes dangereux associés aux scénarii d'accident susceptibles de survenir lors du fonctionnement normal d'une unité de production d'hydrogène par électrolyse.

## 2. Scénarii d'accident identifiés

Comme évoqué précédemment, les scénarii d'accident susceptibles d'être associés à l'électrolyseur d'hydrogène et pouvant conduire à des effets majeurs sur l'environnement, nécessitant d'être évalués en conséquences potentielles, ont été préalablement identifiés, sur la base d'analyses de risques menées sur l'installation concernée et du retour d'expérience sur des équipements similaires.

Les événements accidentels retenus pour faire l'objet d'une évaluation des conséquences, et les phénomènes dangereux associés, sont ainsi les suivants :

- perte de confinement sur la sortie de la cathode :
  - Feu de nuage / UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)
  - Feu torche
  - Projections brûlantes
- perte de confinement sur la sortie de l'anode :
  - Hyperoxie
  - Projections brûlantes
- perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'O<sub>2</sub> :
  - Hyperoxie
- perte de confinement sur la tuyauterie de transfert entre le refroidisseur d'H<sub>2</sub> et l'unité de séchage/purification :
  - Feu de nuage / UVCE
  - Feu torche
- explosion pneumatique du séparateur d'O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>,
- rejet à l'évent H<sub>2</sub> :
  - Feu de nuage / UVCE
  - Feu torche
- rejet à l'évent O<sub>2</sub> :
  - Hyperoxie

Pour chacun des scénarii d'accident, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

## 3. Méthodologie

L'étude s'articule autour des principaux textes suivants :

- l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation,
- la 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 dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

### 3.1. Valeurs des seuils de référence

#### 3.1.1. Seuils des effets thermiques

Le risque d'incendie est à considérer lorsqu'il est possible de réunir simultanément, en présence d'oxygène, un produit combustible et une source d'inflammation d'énergie suffisante.

Les valeurs de référence des seuils thermiques retenues pour les installations classées selon l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005<sup>1</sup> sont les suivantes :

Effets sur les structures :

- 5 kW/m<sup>2</sup> : seuil des destructions de vitres significatives,
- 8 kW/m<sup>2</sup> : seuil des effets dominos et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures,
- 16 kW/m<sup>2</sup> : seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton,
- 20 kW/m<sup>2</sup> : seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton,
- 200 kW/m<sup>2</sup> : seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Effets sur l'homme :

- 3 kW/m<sup>2</sup> ou 600 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>].s : seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine,
- 5 kW/m<sup>2</sup> ou 1000 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>].s : seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine,
- 8 kW/m<sup>2</sup> ou 1800 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>].s : seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

<sup>1</sup> Arrêté relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des ICPE

### 3.1.2. Seuils des effets de surpression

Les valeurs seuils des effets de surpression retenues, issues de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif aux valeurs de référence des seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées sont les suivantes :

Pour les effets sur les structures :

- 20 mbar : seuil des destructions significatives de vitres,
- 50 mbar : seuil des dégâts légers sur les structures,
- 140 mbar : seuil des dégâts graves sur les structures,
- 200 mbar : seuil des effets dominos,
- 300 mbar : seuil des dégâts très graves sur les structures.

Pour les effets sur l'homme :

- 20 mbar : seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme,
- 50 mbar : seuil des effets irréversibles délimitant la zone des dangers significatifs pour la vie humaine,
- 140 mbar : seuil des effets létaux délimitant la zone des dangers graves pour la vie humaine,
- 200 mbar : seuil des effets létaux significatifs délimitant la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

### 3.1.3. Seuils d'effets d'hyperoxie

L'hyperoxie correspond à un excès d'apport en oxygène, pouvant conduire chez l'être humain à un excès d'oxygène dans les poumons ou les tissus, résultant d'une augmentation de la pression partielle alvéolaire par rapport à celle due à une respiration normale d'air ambiant à la pression atmosphérique.

Un niveau d'hyperoxie suffisamment élevé et pendant un temps prolongé peut conduire à des dégâts dans les poumons, les tissus et le système nerveux central.

En l'état des connaissances actuelles, et sur la base d'analyses de risques menées sur des équipements similaires à celui objet de la présente étude, un seuil de concentration en oxygène de 75 % dans l'air ambiant est retenu pour une exposition accidentelle des personnes, pouvant conduire à des effets significatifs sur la santé. Aucun seuil d'effet réglementaire associé au phénomène d'hyperoxie n'est actuellement défini dans la réglementation française.

### 3.1.4. Projections brûlantes

Le phénomène de projections chaudes a été identifié dans le cas d'une perte de confinement en sortie de la cathode ou de l'anode, en raison de la présence d'hydroxyde de potassium (KOH) à une température susceptible d'être élevée dans le fluide concerné, pouvant conduire à des brûlures.

En l'état des connaissances actuelles, et sur la base d'analyses de risques menées sur des équipements similaires à celui objet de la présente étude, l'évaluation des conséquences du phénomène est réalisée pour une température du fluide supérieure ou égale à 50°C. Aucun seuil d'effet réglementaire associé au phénomène de projections brûlantes n'est actuellement défini dans la réglementation française.

## 3.2. Méthodologie de calcul

### 3.2.1. Feu de nuage

Le phénomène de feu de nuage consiste en la combustion d'un nuage inflammable en milieu libre sans générer d'effets de surpression. Le nuage ne peut être enflammé que pour une concentration comprise entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI). En cas de contact avec une source d'ignition, le nuage s'enflammera vers son centre. Il brûlera à la limite formée par la LSI jusqu'à la combustion de la totalité du combustible.

De manière majorante, il est considéré que le nuage ne rencontre aucune source d'inflammation avant d'atteindre la distance maximale à la LII. Les distances aux seuils d'effets thermiques considérés sont alors déterminées conformément à la circulaire du 10 mai 2010, c'est-à-dire :

- distance au seuil des effets létaux significatifs et au seuil des premiers effets létaux = distance à la limite inférieure d'inflammabilité (LII),
- distance au seuil des effets irréversibles =  $1,1 \times$  distance à la LII (formule forfaitaire).

### 3.2.2. UVCE

Le phénomène d'UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion) se matérialise par l'explosion d'un nuage gazeux à l'air libre, suite à la fuite à l'atmosphère d'une substance explosible et à l'ignition de cette masse gazeuse.

Le phénomène se caractérise par :

- une onde de pression le long du nuage explosible (à partir du point d'ignition),
- des effets thermiques dus à la combustion de la masse gazeuse.

Le phénomène présente généralement les phases suivantes :

- rejet à l'atmosphère du composé, sous forme gazeuse ou liquide,
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un nuage inflammable,
- dilution et transport du nuage de gaz dont une partie reste inflammable,
- inflammation du nuage,
- propagation d'un front de flamme des parties inflammables du nuage, ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agissant à la manière d'un piston sur les gaz frais et pouvant être à l'origine d'une onde de pression aérienne (déflagration) si la vitesse de propagation est suffisante,
- éventuellement, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage initialement trop riches en combustible.

La modélisation d'un phénomène d'UVCE s'effectue en 3 étapes :

- détermination du terme source, à savoir la quantité de produit émis à l'atmosphère et les conditions du rejet (diamètre fuite, vitesse, hauteur de rejet, direction du rejet).
- la modélisation de dispersion du nuage, permettant d'estimer l'expansion du nuage explosible. Cette modélisation permet d'obtenir la distance maximale à la limite inférieure d'inflammabilité qui dimensionne les effets thermiques.
- l'estimation des effets de surpression en tenant compte de l'encombrement local.



Afin de prendre en compte l'encombrement et le confinement la méthode Multi-Energie est utilisée. Cette méthode, développée par le TNO Prins Maurits Laboratory, est une méthode de calcul des surpressions aériennes dans le cas de l'explosion de nuage, et prenant en compte les zones en champ libre et celles encombrées.

A chaque explosion « élémentaire » est associé un indice de violence (ou de sévérité), sur une échelle de 1 à 10, qui représente la surpression maximale qui peut être obtenue dans la zone associée. L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé.

Il existe différentes recommandations pour le choix des indices. L'une des plus largement employées est la recommandation de Kinsella<sup>2</sup>. En se basant sur l'analyse d'accidents « majeurs », Kinsella a proposé de choisir les indices de violence d'explosion en prenant en compte :

- l'énergie d'inflammation,
- le degré d'encombrement dû aux obstacles solides,
- et le degré de confinement.

Ces recommandations sont reprises dans le tableau suivant.

Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
Faible	Forte	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	X	X			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
	X		X		X		5-7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X		X	4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

Dans le tableau précédent, l'énergie d'inflammation est à considérer comme :

- forte lorsqu'une explosion confinée peut être à l'origine de l'inflammation du nuage,
- ou faible lorsque la source d'inflammation potentielle se limite aux sources courantes comme les surfaces chaudes, les étincelles, ...

Le degré d'encombrement est :

- fort lorsque le volume des obstacles correspond à plus de 30 % du volume total de la zone encombrée, l'espace entre obstacles étant inférieur ou égal à 3 m,
- faible lorsque des obstacles existent mais que les conditions précédentes ne sont pas simultanément satisfaites,
- et inexistant lorsqu'il n'y a pas d'obstacle dans le nuage inflammable.

<sup>2</sup> K.G. Kinsella, A Rapid assessment methodology for the prediction of vapour cloud explosion overpressure, proceedings of the International Conference and Exhibition on Safety, Health and Loss Prevention in Oil, Chemical and Process Industries, 1993

Le confinement est à considérer de façon « binaire » comme :

- existant lorsque le nuage inflammable est confiné par des surfaces solides sur 2 à 3 faces,
- et inexistant si la seule surface solide à considérer est le sol.

Enfin, les niveaux maxima et les courbes d'atténuation de la surpression en fonction de la distance sont donnés, pour chaque indice, sur des abaques.

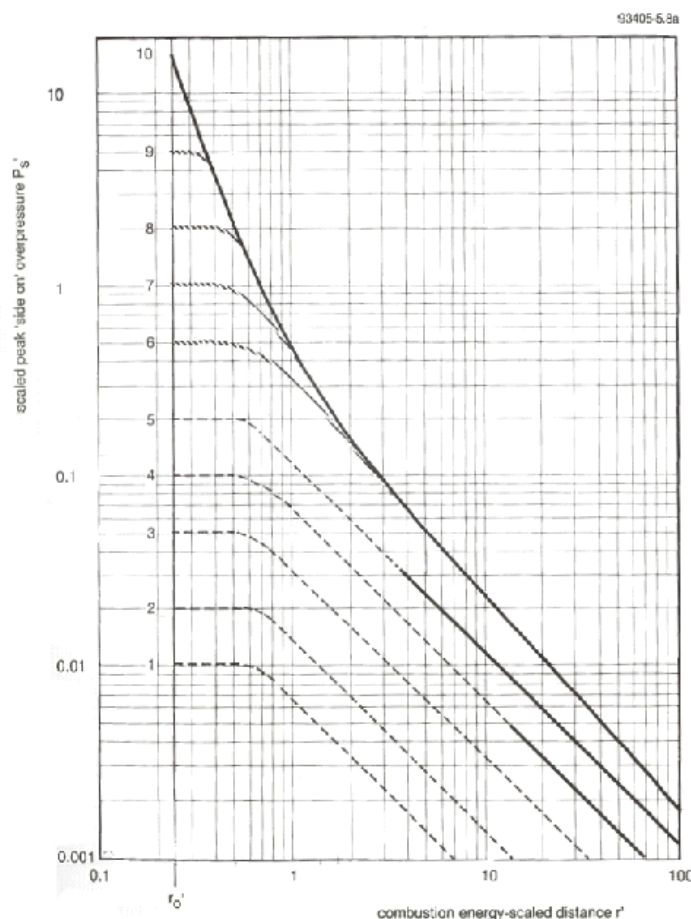


Figure 1 : Abaque relatif à la méthode multi-énergie de décroissance des surpressions aériennes

### 3.2.3. Feu torche

Les feux torche, aussi appelés jets enflammés, peuvent survenir suite à des fuites accidentelles de fluides inflammables ou à des évacuations intentionnelles de produits résiduels par l'intermédiaire de torchères. Les feux torche sont attendus dans le cas d'une fuite de gaz sur un équipement haute pression tel qu'une pompe ou une ligne pressurisée. Il peut aussi se produire dans le cas d'une fuite de liquide contenant du gaz dissous qui, en flashant, entraînera la formation de gouttelettes. Une condition typique pour ce phénomène est une pression supérieure à 2 bar.

Un feu torche se caractérise par :

- son aspect chimique lié aux réactions chimiques qui s'effectuent au cours du processus de combustion entre l'oxygène de l'air et les gaz de combustion. Elles produisent généralement du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de la vapeur d'eau, des suies et des imbrûlés.

- la production de chaleur résultant des réactions exothermiques transmise sous forme de diffusion, convection et rayonnement,
- le transfert de masse par convection ou diffusion de certaines espèces dans la flamme.

Le modèle de calcul utilisé par le logiciel PHAST v8.4 correspond au modèle du « cone model ». Ce modèle assimile la flamme à un volume de géométrie simple dont les surfaces rayonnent uniformément.

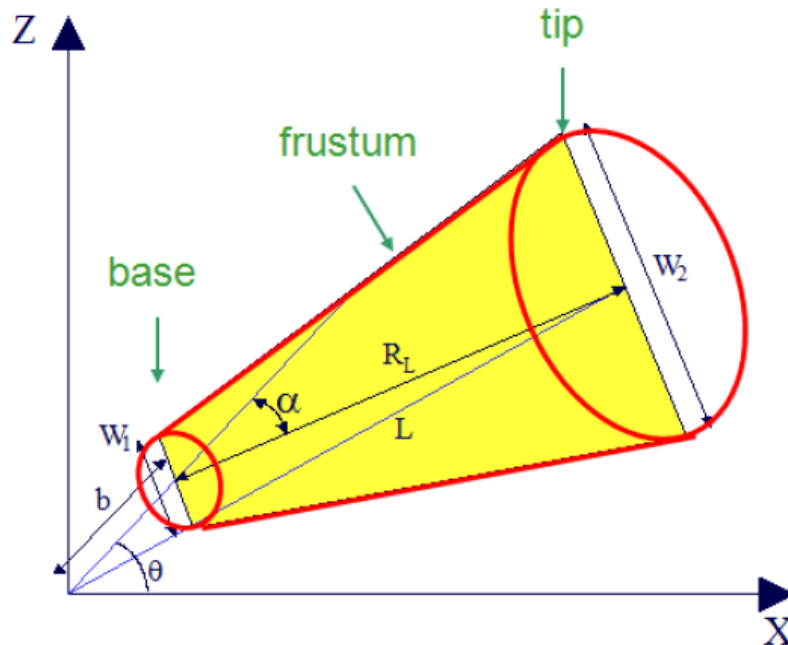


Figure 2 : Modèle du feu torche

Le flux radiatif  $q_c$  ( $W/m^2$ ) s'écrit sous la forme :

$$q_c = SEP \cdot F_{view} \cdot \tau_a$$

Avec SEP : pouvoir émissif de la flamme ( $W/m^2$ )

$F_{view}$  : facteur de vue

$\tau_a$  : transmissivité atmosphérique

La SEP (Surface Emissive Power) correspond à la fraction rayonnée de la puissance totale réellement dégagée par la combustion rapportée à la surface totale de la flamme :

$$SEP = \frac{F_s m H_{comb}}{A}$$

Avec  $F_s$  : fraction rayonnée de la puissance totale

$M$  : flux ( $kg/s$ )

$H_{comb}$  : chaleur de combustion du produit

$A$  : surface totale de la flamme

### 3.2.4. Explosion pneumatique de capacité

Les effets de surpression provoqués par l'éclatement d'une capacité sont calculés à partir de la méthode PROJEX mise en place par l'INERIS et décrite dans le document « Oméga 15 : les éclatements de réservoirs ». Cette méthode s'appuie sur le calcul de l'énergie de Brode (énergie interne du réservoir produite par l'augmentation de pression) associé à un indice Multi-énergie de 10 (cas d'une détonation), qui permet d'être plus adapté au phénomène d'éclatement de capacité.

L'énergie de Brode se calcule de la manière suivante :

$$E_{Brode} = \frac{(p_1 - p_0) \cdot V_1}{\gamma_1 - 1}$$

Avec :

- $P_1$  : pression de rupture de l'enceinte (Pa),
- $P_0$  : pression ambiante (Pa),
- $V_1$  : volume de l'enceinte ( $m^3$ ),
- $\gamma_1$  : rapport des chaleurs spécifiques du gaz contenu dans l'enceinte.

A partir de l'abaque TNO indice 10, la distance réduite  $r'$  permet de remonter à la distance pour chaque effet de surpression à l'aide de la relation suivante :

$$r = r' \left( \frac{E}{Pa} \right)^{1/3}$$

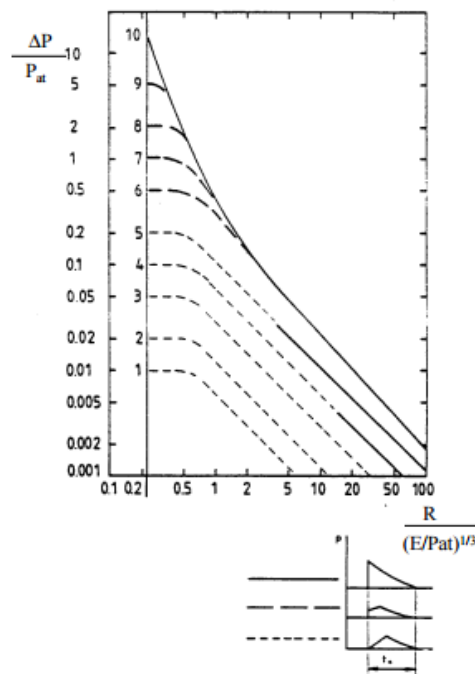


Figure 3 : Abaque relatif à la méthode Multi-énergie

Les distances réduites  $r'$  relatives aux différentes valeurs de surpression d'intérêt déterminées à partir de l'abaque sont les suivantes :

Valeurs de surpression (mbar)	300	200	140	50
$R'$	1,5	1,8	2,375	5,25

La distance aux effets de surpression de 20 mbar est prise égale au double de celle atteinte par les effets de 50 mbar.

### 3.2.5. Dispersion atmosphérique

L'ensemble des phénomènes dangereux de dispersion a été modélisé à l'aide du logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) v.8.4, développé par la société DNV Software.

Ce logiciel est aujourd'hui le logiciel commercial le plus fréquemment utilisé dans les modélisations des Études de Dangers. Les résultats de différentes simulations de scénarii accidentels réalisées par l'INERIS (INERIS, Evaluation des versions 6.0 et 6.1 de PHAST, 2002), montrent que les modèles implémentés dans le logiciel PHAST sont adaptés à la modélisation de la dispersion atmosphérique de gaz dans l'environnement.

Les calculs de dispersion atmosphérique enchaînent plusieurs modèles différents en fonction des caractéristiques thermocinétiques du terme source et de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du mélange air/produit :

- tout d'abord le logiciel utilise un modèle intégral de type « jet libre turbulent » (horizontal, vertical ou incliné). Ce modèle permet de décrire la dispersion atmosphérique dans la zone proche du rejet lorsque son énergie cinétique et sa densité sont encore importantes. Le gradient de vitesse entre l'air ambiant et le jet induit une turbulence importante (formation de vortex) localisée principalement en bordure de nuage. Ceci provoque l'entraînement d'air atmosphérique à l'intérieur du jet. Ce phénomène a pour conséquence d'une part un ralentissement du jet par échange de quantité de mouvement, et d'autre part la diminution de la densité du panache. Lorsque la densité du jet tend vers la densité de l'air ambiant et la vitesse du jet vers la vitesse du vent, le gaz peut être considéré comme un gaz passif.
- le logiciel utilise ensuite soit :
  - un modèle de type « gaz lourd », qui permet de gérer la dispersion gaussienne de type gaz lourd, notamment en prenant en compte l'interaction panache sol,
  - un modèle de panache gaussien de type « gaz passif ».

Le logiciel utilise automatiquement le modèle adapté aux conditions thermocinétiques du jet. Il gère également les transitions et le passage d'un modèle à un autre en fonction de différents critères. On peut citer par exemple l'écart de vitesse entre le jet et le vent, l'écart de la masse volumique du jet et de l'air ambiant, ...

L'enchaînement de plusieurs types de modèles permet, dans une certaine mesure, de pallier la faiblesse des modèles gaussiens de dispersion en champ proche.

Les calculs permettent d'évaluer et de visualiser les caractéristiques du panache gazeux : forme, dimensions, concentrations en fonction de la distance et du temps écoulé. Ils prennent notamment en compte les conditions météorologiques, vitesse du vent et stabilité de l'atmosphère, et le type de terrain environnant : terrain plat, zone agricole, zone industrielle ou urbaine. En revanche, l'effet du relief et des obstacles n'est pas modélisé.

Les paramètres les plus importants pour les problèmes liés à la dispersion atmosphérique sont :

- la direction du vent,
- la vitesse du vent,
- la température extérieure,
- la stabilité de l'atmosphère.

La stabilité de l'atmosphère est le paramètre le plus complexe à déterminer (dans la majorité des cas, elle n'est pas mesurée). Ce paramètre destiné à quantifier les propriétés diffusives de l'air dans les basses couches, conduit à distinguer 6 catégories de stabilité (classes de Pasquill) de l'atmosphère.

Deux situations météorologiques pénalisantes préconisées dans la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, et présentées ci-après, sont habituellement testées pour les gaz lourds et les rejets au niveau du sol. Il est à noter qu'une situation météorologique traduisant un rejet en intérieur (vent faible) est également retenue.

Condition atmosphérique	(D, 5)	(F, 3)	(G, 1)
Stabilité atmosphérique (Classe de Pasquill)	D (neutre)	F (très stable)	G (très stable)
Vitesse du vent	5 m/s	3 m/s	1 m/s
Température ambiante	20 °C	15 °C	15°C
Humidité relative	70 %	70 %	70 %
Rugosité	1 m	1 m	1 m

La valeur du paramètre de rugosité retenue correspond à une valeur standard pour des modélisations de rejets avec le logiciel PHAST sur un terrain industriel.

La condition (D, 5) permet de représenter des situations courantes (condition atmosphérique neutre et vitesse de vent de 5 m/s), et la condition (F, 3) permet une évaluation des conséquences dans des conditions défavorables (atmosphère très stable et vent de 3 m/s).

**Il est à noter que les modélisations ont également été réalisées pour les autres valeurs limites de température (33°C) et d'humidité (50%) susceptibles d'être rencontrées ; il en ressort que ces paramètres ne font pas évoluer significativement les résultats, et ne correspondent pas aux situations majorantes.**

### 3.2.6. Projections brûlantes

Pour le phénomène de projections pouvant engendrer des brûlures pour l'homme, une distance forfaitaire d'éloignement est retenue, sur la base du retour d'expérience issu d'installations similaires et des évaluations des risques associées.

## 4. Modélisations

### 4.1. Perte de confinement en sortie de la cathode – Feu torche et UVCE d'hydrogène / Projections brûlantes

L'événement considéré est une perte de confinement au niveau d'une tuyauterie en sortie de la cathode de l'électrolyseur d'hydrogène.

Suite à la perte de confinement, un mélange de gaz, contenant notamment de l'hydrogène, se disperse à l'atmosphère ; un feu torche peut alors se produire en cas d'introduction immédiate d'une source d'ignition, ou un UVCE (explosion de nuage à l'air libre) si la source d'ignition est différée et qu'un nuage inflammable a eu le temps de se former dans les conditions d'inflammabilité.

De manière majorante, le cas de la rupture totale est retenu ici. De plus, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

De manière majorante, et du fait de l'importante réactivité de l'hydrogène, un indice d'explosion de 10 est retenu pour l'évaluation des effets de surpression de l'UVCE. Il est considéré que la totalité du nuage inflammable se situe au sein d'une zone encombrée, et participe ainsi au phénomène d'UVCE.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 68,7 % Hydroxyde de potassium (KOH) : 31,07 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 0,22 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 0,01 %
<b>Etat</b>	Biphasique
<b>Température</b>	85°C
<b>Pression maximale de service</b>	31 bar
<b>Diamètre de la tuyauterie</b>	6"
<b>Limite Inférieure d'Explosivité dans l'air (LIE)</b>	40 000 ppm (H <sub>2</sub> )
<b>Diamètre de la fuite</b>	100% (rupture totale)
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein des tableaux ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante.

FEU TORCHE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m²)	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m²)	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m²)
	Non atteint	Non atteint	Non atteint

FEU DE NUAGE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m²)	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m²)	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m²)
	Non atteint	Non atteint	Non atteint

UVCE Distance des effets de surpression	Seuil des effets indirects (20 mbar)	Seuil des Effets Irréversibles (50 mbar)	Seuil des premiers Effets Létaux (140 mbar)	Seuil des Effets Létaux significatifs (200 mbar)
	Non atteint	Non atteint	Non atteint	Non atteint

La LIE de l'hydrogène n'est pas atteinte.

Concernant le phénomène de projections brûlantes, comme vu précédemment, une distance de sécurité forfaitaire est proposée :

PROJECTIONS BRULANTES Distance des effets de brûlures	Température de 50°C
	7 m



## 4.2. Perte de confinement en sortie de l'anode – Hyperoxie et projections brûlantes

L'événement considéré est une perte de confinement au niveau d'une tuyauterie en sortie de l'anode de l'électrolyseur d'hydrogène.

Suite à la perte de confinement, un mélange de gaz, contenant notamment de l'oxygène, se disperse à l'atmosphère ; un phénomène d'hyperoxie peut alors survenir, en raison de l'augmentation de la concentration en oxygène dans l'air ambiant.

De manière majorante, le cas de la rupture totale est retenu ici. De plus, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 69,39 % Hydroxyde de potassium (KOH) : 28,93 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 1,68 %
<b>Etat</b>	Biphasique
<b>Température</b>	85°C
<b>Pression maximale de service</b>	31 bar
<b>Diamètre de la tuyauterie</b>	6"
<b>Diamètre de la fuite</b>	100% (rupture totale)
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein du tableau ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante :

Distance des effets d'hyperoxie	Concentration en O <sub>2</sub> de 75 %
	Non atteint

Concernant le phénomène de projections brûlantes, comme vu précédemment, une distance de sécurité forfaitaire est proposée :

PROJECTIONS BRULANTES	Température de 50°C
Distance des effets de brûlures	7 m

### 4.3. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'oxygène - Hyperoxie

L'événement considéré est une perte de confinement au niveau d'une tuyauterie en sortie du refroidisseur d'oxygène.

Suite à la perte de confinement, un mélange de gaz, contenant notamment de l'oxygène, se disperse à l'atmosphère ; un phénomène d'hyperoxie peut alors survenir, en raison de l'augmentation de la concentration en oxygène dans l'air ambiant.

De manière majorante, le cas de la rupture totale est retenu ici. De plus, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 0,33 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 0,08 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 99,59 %
<b>Etat</b>	Biphasique
<b>Température</b>	30°C
<b>Pression maximale de service</b>	31 bar
<b>Diamètre de la tuyauterie</b>	2"
<b>Diamètre de la fuite</b>	100% (rupture totale)
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein du tableau ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante :

Distance des effets d'hyperoxie	Concentration en O <sub>2</sub> de 75 %
	1 m

## 4.4. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'hydrogène (ligne 6'') – Feu torche et UVCE d'hydrogène

L'événement considéré est une perte de confinement au niveau d'une tuyauterie en sortie du refroidisseur d'hydrogène, en amont de l'unité de séchage/purification (outlet 6'').

Suite à la perte de confinement, un mélange de gaz, contenant notamment de l'hydrogène, se disperse à l'atmosphère ; un feu torche peut alors se produire en cas d'introduction immédiate d'une source d'ignition, ou un UVCE (explosion de nuage à l'air libre) si la source d'ignition est différée et qu'un nuage inflammable a eu le temps de se former dans les conditions d'inflammabilité.

De manière majorante, le cas de la rupture totale est retenu ici. De plus, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

De manière majorante, et du fait de l'importante réactivité de l'hydrogène, un indice d'explosion de 10 est retenu pour l'évaluation des effets de surpression de l'UVCE. Il est considéré que la totalité du nuage inflammable se situe au sein d'une zone encombrée, et participe ainsi au phénomène d'UVCE.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 4,05 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 89,57 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 6,38 %
<b>Etat</b>	Biphasique
<b>Température</b>	85°C
<b>Pression maximale de service</b>	15 bar
<b>Diamètre de la tuyauterie</b>	6''
<b>Limite Inférieure d'Explosivité dans l'air (LIE)</b>	40 000 ppm (H <sub>2</sub> )
<b>Diamètre de la fuite</b>	100% (rupture totale)
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein des tableaux ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante.

FEU TORCHE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m <sup>2</sup> )
	7,5 m	7,5 m	7,5 m

FEU DE NUAGE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m <sup>2</sup> )
	2,5 m	2 m	2 m

UVCE Distance des effets de surpression	Seuil des effets indirects (20 mbar)	Seuil des Effets Irréversibles (50 mbar)	Seuil des premiers Effets Létaux (140 mbar)	Seuil des Effets Létaux significatifs (200 mbar)
	36 m	18 m	8 m	7 m

## 4.5. Perte de confinement en sortie du refroidisseur d'hydrogène (ligne 2'') – Feu torche et UVCE d'hydrogène

L'événement considéré est une perte de confinement au niveau d'une tuyauterie en sortie du refroidisseur d'hydrogène, en amont de l'unité de séchage/purification (outlet 2'').

Suite à la perte de confinement, un mélange de gaz, contenant notamment de l'hydrogène, se disperse à l'atmosphère ; un feu torche peut alors se produire en cas d'introduction immédiate d'une source d'ignition, ou un UVCE (explosion de nuage à l'air libre) si la source d'ignition est différée et qu'un nuage inflammable a eu le temps de se former dans les conditions d'inflammabilité.

De manière majorante, le cas de la rupture totale est retenu ici. De plus, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...), de manière dimensionnante.

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

De manière majorante, et du fait de l'importante réactivité de l'hydrogène, un indice d'explosion de 10 est retenu pour l'évaluation des effets de surpression de l'UVCE. Il est considéré que la totalité du nuage inflammable se situe au sein d'une zone encombrée, et participe ainsi au phénomène d'UVCE.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 4,05 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 89,57 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 6,38 %
<b>Etat</b>	Gazeux
<b>Température</b>	30°C
<b>Pression maximale de service</b>	31 bar
<b>Diamètre de la tuyauterie</b>	2''
<b>Limite Inférieure d'Explosivité dans l'air (LIE)</b>	40 000 ppm (H <sub>2</sub> )
<b>Diamètre de la fuite</b>	100% (rupture totale)
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein des tableaux ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante.

FEU TORCHE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m²)	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m²)	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m²)
	6 m	6 m	6 m

FEU DE NUAGE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m²)	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m²)	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m²)
	3,5 m	3 m	3 m

UVCE Distance des effets de surpression	Seuil des effets indirects (20 mbar)	Seuil des Effets Irréversibles (50 mbar)	Seuil des premiers Effets Létaux (140 mbar)	Seuil des Effets Létaux significatifs (200 mbar)
	36 m	18 m	9 m	7 m

## 4.6. Explosion pneumatique du séparateur O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>

Le scénario d'accident étudié correspond à l'explosion d'un nuage inflammable au sein du séparateur d'oxygène et d'hydrogène, suite à une accumulation anormale de vapeurs inflammables et l'introduction d'une source d'ignition.

La modélisation a été réalisée sur la base de l'équation de Brode pour la détermination de l'énergie disponible d'explosion, ainsi que sur la méthode équivalent TNT pour évaluer l'atténuation des effets de pression.

De manière majorante, il est considéré que la totalité de la capacité du séparateur est entièrement remplie de vapeurs inflammables, dans le domaine d'inflammabilité.

La pression statique de rupture est calculée sur la base de la mechanical design pressure des parois de l'équipement (37 bar).

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Hydrogène
<b>Volume</b>	2,4 m <sup>3</sup>
<b>Pression statique de rupture</b>	44,8 bar (37 bar * 1,21)

Les résultats sont présentés au sein du tableau ci-dessous :

Distance d'effets de surpression depuis le centre de l'équipement	Seuil des effets indirects (bris de vitre) 20 mbar	Seuil des Effets Irréversibles (SEI) 50 mbar	Seuil des premiers Effets Létaux (SpEL) 140 mbar	Seuil des Effets Létaux significatifs (SELS) 200 mbar
	64 m	32 m	14 m	9 m



## 4.7. Rejet à l'évent H<sub>2</sub> – Feu torche et UVCE d'hydrogène

L'événement considéré est un rejet à l'évent H<sub>2</sub>.

Un mélange de gaz, contenant notamment de l'hydrogène, se disperse à l'atmosphère ; un feu torche peut alors se produire en cas d'introduction immédiate d'une source d'ignition, ou un UVCE (explosion de nuage à l'air libre) si la source d'ignition est différée et qu'un nuage inflammable a eu le temps de se former dans les conditions d'inflammabilité.

De manière majorante, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...).

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

De manière majorante, et du fait de l'importante réactivité de l'hydrogène, un indice d'explosion de 10 est retenu pour l'évaluation des effets de surpression de l'UVCE. Il est considéré que la totalité du nuage inflammable se situe au sein d'une zone encombrée, et participe ainsi au phénomène d'UVCE.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 8,84 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 86,25 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 4,91 %
<b>Etat</b>	Gazeux
<b>Température</b>	30°C
<b>Pression</b>	Pression atmosphérique
<b>Limite Inférieure d'Explosivité dans l'air (LIE)</b>	40 000 ppm (H <sub>2</sub> )
<b>Diamètre de la fuite</b>	4''
<b>Débit à l'évent</b>	102 kg/h
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein des tableaux ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante.

FEU TORCHE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m <sup>2</sup> )
	7,5 m	7,5 m	7,5 m

FEU DE NUAGE Distance des effets thermiques	Seuil des Effets Irréversibles (3 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des premiers Effets Létaux (5 kW/m <sup>2</sup> )	Seuil des Effets Létaux significatifs (8 kW/m <sup>2</sup> )
	3 m	2,5 m	2,5 m

UVCE Distance des effets de surpression	Seuil des effets indirects (20 mbar)	Seuil des Effets Irréversibles (50 mbar)	Seuil des premiers Effets Létaux (140 mbar)	Seuil des Effets Létaux significatifs (200 mbar)
	38 m	19 m	9 m	7 m

## 4.8. Rejet à l'évent O<sub>2</sub> – Hyperoxie

L'événement considéré est un rejet à l'évent O<sub>2</sub>.

Un mélange de gaz, contenant notamment de l'oxygène, se disperse à l'atmosphère ; un phénomène d'hyperoxie peut alors survenir, en raison de l'augmentation de la concentration en oxygène dans l'air ambiant.

De manière majorante, les conditions opératoires les plus défavorables sont retenues (composition du fluide, température, pression...).

Comme évoqué précédemment, les conditions météorologiques retenues sont les suivantes :

- (1, G) : atmosphère très stable, vitesse du vent de 1 m/s et température de 15°C,
- (3, F) : atmosphère stable, vitesse du vent de 3 m/s et température de 15°C,
- (5, D) : atmosphère neutre, vitesse du vent de 5 m/s et température de 20°C.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHAST v8.4.

Les hypothèses d'entrée sont les suivantes :

<b>Produit</b>	Mélange (composition massique) : Eau (H <sub>2</sub> O) : 0,77 % Hydrogène (H <sub>2</sub> ) : 0,07 % Oxygène (O <sub>2</sub> ) : 99,16 %
<b>Etat</b>	Gazeux
<b>Température</b>	30°C
<b>Pression</b>	Pression atmosphérique
<b>Diamètre de la fuite</b>	3"
<b>Débit à l'évent</b>	701 kg/h
<b>Hauteur du rejet</b>	1 m
<b>Direction du rejet</b>	Horizontale

Les résultats sont présentés au sein du tableau ci-après, dans la condition météorologique la plus pénalisante :

Distance des effets d'hyperoxie	Concentration en O <sub>2</sub> de 75 %
	0,5 m

## 5. Conclusion

La présente étude s'est attachée à évaluer les risques associés à un électrolyseur d'hydrogène, à l'aide de modélisations des phénomènes dangereux liés aux scénarii d'accident préalablement identifiés.

Les résultats des modélisations des différents phénomènes dangereux sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Scénario d'accident	Feu torche	Feu de nuage	UVCE	Hyperoxie	Explosion pneumatique	Projections brûlantes
Perte de confinement sur la sortie de la cathode	Seuils non atteints	Seuils non atteints	Seuils non atteints	-	-	7 m
Perte de confinement sur la sortie de l'anode	-	-	-	Seuil non atteint	-	7 m
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'O <sub>2</sub>	-	-	-	1 m	-	-
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'H <sub>2</sub> (outlet 6'')	3 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m	3 kW/m <sup>2</sup> : 2,5 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 2 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 2 m	20 mbar : 36 m 50 mbar : 18 m 140 mbar : 8 m 200 mbar : 7 m	-	-	-
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'H <sub>2</sub> (outlet 2'')	3 kW/m <sup>2</sup> : 6 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 6 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 6 m	3 kW/m <sup>2</sup> : 3,5 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 3 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 3 m	20 mbar : 36 m 50 mbar : 18 m 140 mbar : 9 m 200 mbar : 7 m	-	-	-
Explosion pneumatique du séparateur d'O <sub>2</sub> et H <sub>2</sub>	-	-	-	-	20 mbar : 64 m 50 mbar : 32 m 140 mbar : 14 m 200 mbar : 9 m	-
Rejet à l'évent H <sub>2</sub>	3 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 7,5 m	3 kW/m <sup>2</sup> : 3 m 5 kW/m <sup>2</sup> : 2,5 m 8 kW/m <sup>2</sup> : 2,5 m	20 mbar : 38 m 50 mbar : 19 m 140 mbar : 9 m 200 mbar : 7 m	-	-	-
Rejet à l'évent O <sub>2</sub>	-	-	-	0,5 m	-	-

Le tableau ci-dessous synthétise également l'ensemble des données d'entrée employées :

Scénario d'accident	Composition du produit				Température	Pression	Diamètre de fuite	Volume	Pression de rupture
	H <sub>2</sub> O	KOH	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>					
Perte de confinement sur la sortie de la cathode	68,7 %	31,07 %	0,22 %	0,01 %	85°C	31 bar	6"	-	-
Perte de confinement sur la sortie de l'anode	69,39 %	28,93 %	-	1,68 %	85°C	31 bar	6"	-	-
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'O <sub>2</sub>	0,33 %	-	0,08 %	99,59 %	30°C	31 bar	2"	-	-
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'H <sub>2</sub> (outlet 6")	4,05 %	-	89,57 %	6,38 %	85°C	15 bar	6"	-	-
Perte de confinement sur la sortie du refroidisseur d'H <sub>2</sub> (outlet 2")	4,05 %	-	89,57 %	6,38 %	30°C	31 bar	2"	-	-
Explosion pneumatique du séparateur d'O <sub>2</sub> et H <sub>2</sub>	-	-	100 %	-	-	-	-	2,4 m <sup>3</sup>	44,8 bar
Rejet à l'évent H <sub>2</sub>	8,84 %	-	86,25 %	4,91 %	30°C	Pression atmosphérique	4"	-	-
Rejet à l'évent O <sub>2</sub>	0,77 %	-	0,07 %	99,16 %	30°C	Pression atmosphérique	3"	-	-