



Ingénierie de la sécurité appliquée à des applications hydrogène-énergie

Audrey Duclos, Christophe Proust, Jérôme Daubech, Franck Verbecke

► **To cite this version:**

Audrey Duclos, Christophe Proust, Jérôme Daubech, Franck Verbecke. Ingénierie de la sécurité appliquée à des applications hydrogène-énergie. 16. Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP 2017), Jul 2017, Nancy, France. ineris-01863200

HAL Id: ineris-01863200

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01863200>

Submitted on 28 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INGENIERIE DE LA SECURITE APPLIQUEE A DES APPLICATIONS HYDROGENE-ENERGIE

DUCLOS Audrey ^{a*} ^b, PROUST Christophe ^{a,c}, DAUBECH Jérôme ^c, VERBECKE Franck ^b

^a Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, EA 4297 TIMR
Centre de Recherche de Royallieu, CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

^b AREVA Stockage d'Énergie
Domaine du Petit Arbois, BP71, 13545 Aix en Provence Cedex 04, France

^c Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France,

Résumé

Depuis quelques années, l'hydrogène apparaît comme un vecteur d'énergie crédible. AREVA Stockage d'Énergie développe, dans ce cadre, des solutions de stockage d'énergie, permettant de transformer l'énergie électrique en énergie chimique (de l'hydrogène) afin de la stocker. Cependant les applications hydrogène sont toujours considérées dangereuses, tant est redouté un événement dangereux tel qu'une explosion qui pourrait avoir lieu si une fuite d'hydrogène se produisait. Il faut reconnaître que les fuites d'hydrogène peuvent produire de vastes nuages inflammables à cause de sa plage d'inflammabilité étendue et qu'un mélange hydrogène-air peut s'enflammer extrêmement facilement et brûler rapidement et violemment. En comparant l'hydrogène aux autres carburants usuels, sa plage d'inflammabilité est 5 à 10 fois plus étendue, son énergie minimale d'inflammation est 5 à 10 fois plus faible et sa vitesse maximale de propagation est aussi 5 à 10 fois plus importante. Cependant, grâce à ses propriétés physiques, l'hydrogène peut offrir des avantages appréciables en termes de sécurité/mitigation, tels que sa densité plus faible que l'air entraînant une dispersion rapide. Les ingénieurs de conception doivent faire face à cette réalité et la conséquence logique est que la démonstration de la sécurité doit être solide et clairement compréhensible. La sécurité est donc l'enjeu essentiel pour l'introduction des objets hydrogène sur le marché.

Dans l'hypothèse où ce risque serait inacceptable pour l'utilisateur (trop grande proximité avec des enjeux forts, un environnement sensible...), il faut être capable de faire évoluer le procédé proposé puis de requalifier le risque. L'objectif de ce travail est de constituer l'outil qui permette de faire cela. On vise en quelque sorte un outil d'ingénierie de la sécurité.

L'objectif de cette communication est de présenter le travail accompli et l'outil. Les principaux points sur lequel ce travail a porté sont les suivants :

- Conception d'une matrice d'acceptabilité : elle comporte une dimension probabilité de l'accident et gravité de l'accident. Le cas spécifique d'AREVA Stockage d'Énergie est présenté mais la matrice pourrait être constituée sur la base de critères différents ;
- Identification des « événements redoutés centraux » ou ERC (Laurent, 2011) : dans le cas des objets hydrogène, il s'agit principalement de fuites et accessoirement d'éclatements de capacité. L'ERC est l'événement ultime d'une série d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Sur cet enchaînement, des calculs de probabilité sont possibles. Dès lors que l'ERC s'est produit la séquence d'événements qui suit est jugée

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : audrey.duclos@utc.fr

inexorable, automatique sans relation de cause à effet entre les événements mais suivant une séquence temporelle. La probabilité de l'accident est donc celle de l'ERC ;

- Calcul du risque : pour chaque ERC, un arbre de défaillances est construit en amont de l'ERC et un arbre d'évènements en aval. L'architecture de l'arbre de défaillances permet de calculer la probabilité de l'ERC si la probabilité des événements les plus en amont est connue. Dans le cadre du risque majeur, où la précision des estimations requise est moyenne, on utilise des bases de données génériques relatives aux accidents majeurs. On a montré que ces bases de données, plutôt anciennes et relatives aux technologies des hydrocarbures, ne sont pas adaptées ni à la finesse de l'outil ni aux objets hydrogène. Comme par ailleurs le retour d'expérience sur ces objets est très limité, on a développé une approche nouvelle basée sur le prolongement vers l'amont des arbres de défaillances. Par ailleurs les méthodes d'estimation des conséquences des accidents habituellement employées pour les accidents majeurs ne sont pas adaptées. Il faut être capable notamment d'estimer assez précisément les caractéristiques d'un nuage inflammable d'une part pour prédire les effets de l'explosion mais aussi pour dimensionner les barrières (événements, limiteurs de débit...). Une boîte à outil spécifique a été développée pour cela.

Mots-clés : méthodes d'analyse des risques, hydrogène, nœud papillon, barrières de sécurité

1. Introduction

Depuis quelques années, l'hydrogène apparaît comme un vecteur d'énergie crédible. AREVA Stockage d'Énergie développe, dans ce cadre, des solutions de stockage d'énergie, permettant de transformer l'énergie électrique en énergie chimique (de l'hydrogène) afin de la stocker.

Cependant les applications hydrogène sont toujours considérées dangereuses, tant est redouté un événement dangereux tel qu'une explosion qui pourrait avoir lieu si une fuite d'hydrogène se produisait. Ainsi la pleine acceptation de tels objets hydrogène sur les marchés ne se fera que via l'acceptation par le public. Il faut reconnaître que les fuites d'hydrogène peuvent produire de vastes nuages inflammables à cause de sa plage d'inflammabilité étendue et qu'un mélange hydrogène-air peut s'enflammer extrêmement facilement et brûler rapidement et violemment. En comparant l'hydrogène aux autres carburants usuels, sa plage d'inflammabilité est 5 à 10 fois plus étendue, son énergie minimale d'inflammation est 5 à 10 fois plus faible et sa vitesse maximale de propagation est aussi 5 à 10 fois plus importante. Cependant, grâce à ses propriétés physiques, l'hydrogène peut offrir des avantages appréciables en termes de sécurité/mitigation, tels que sa densité plus faible que l'air entraînant une dispersion rapide.

Les ingénieurs de conception doivent faire face à cette réalité et la conséquence logique est que la démonstration de la sécurité doit être solide et clairement compréhensible. La sécurité est donc l'enjeu essentiel pour l'introduction des objets hydrogène sur le marché.

Le risque « hydrogène » est principalement constitué des scénarios d'explosion et d'incendie (« feux torches »). De ce fait, les objets et technologies de l'hydrogène peuvent entrer dans de nombreuses catégories de risques dont les risques majeurs et le risque ATEX qui peuvent avoir une profonde incidence sur la conception de ces technologies de l'hydrogène. Un accident majeur ; tel que défini dans la directive SEVESO (Parlement Européen, 2012), « désigne un événement (émission, incendie ou explosion) d'importance majeure qui résulte de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement ... et qui entraîne pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et/ou pour l'environnement un danger grave, immédiat ou différé, et qui fait intervenir une ou plusieurs substances dangereuses ». Pour les applications hydrogène, la limite au-dessus de laquelle une installation entre dans ce périmètre est 100 kg.

Néanmoins pour de nombreuses applications hydrogène, la quantité stockée d'hydrogène est souvent en dessous de ces 100 kg (cinq kilogrammes stockés dans la Toyota Mirai, de l'ordre du kilogramme dans la Greenergy Box TM) mais reste le risque ATEX et les potentiels effets dominos qui pourraient surgir dans l'hypothèse où le système hydrogène était installé dans une installation industrielle classée pour la protection de l'environnement. Pour ces deux situations, une démonstration de maîtrise des risques est à faire qui permet de quantifier à la fois la probabilité de survenue du risque (une fuite) et ses conséquences.

Dans l'hypothèse où ce risque serait inacceptable pour l'utilisateur (trop grande proximité avec des enjeux forts, un environnement sensible...), il faut être capable de faire évoluer le procédé proposé puis de requalifier le risque. L'objectif de ce travail est de constituer l'outil qui permette de faire cela. On vise en quelque sorte un outil d'ingénierie de la sécurité.

L'objectif de cette communication est de présenter le travail accompli et l'outil.

2. L'objet Hydrogène étudié : La Greenergy Box

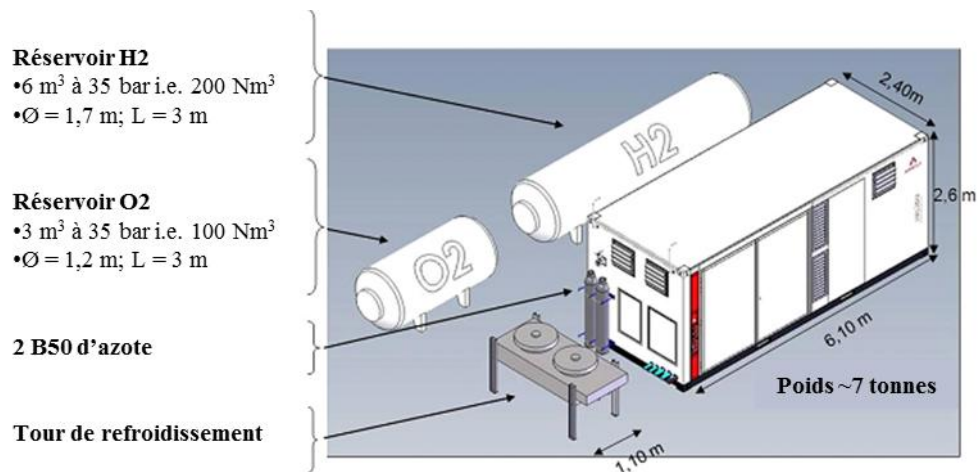


Figure 1. Illustration de la Greenergy Box (Verbecke et Vesly, 2013)

La Greenergy Box (Figure 1), développée par AREVA Stockage d'Énergie, est une chaîne hydrogène containerisée ; comprenant un électrolyseur, une pile à combustible, un système de gestion de l'eau et de la chaleur et un convertisseur d'énergie ; couplée à un stockage sous pression d'hydrogène et d'oxygène à l'extérieur du container. Un système de démonstration, la plateforme MYRTE (Figure 2), est installé en Corse, près d'Ajaccio.

Table 1. Données techniques de la Greenergy Box

Stockage	Pression	35	bar
	Volume d'hydrogène	6	m ³
	Volume d'oxygène	3	m ³
Canalisations	Diamètre	9.5	mm
	Longueur dans le container	45	m
	Longueur à l'extérieur du container	6	m
	Pression dans le sous-système Pile à combustible	9 to 2	bar
Container	Pression dans le sous-système Electrolyseur	40	bar
	Volume libre	20	m ³
	Température ambiante	288	K

La table ci-dessus regroupe les différentes données techniques nécessaires à une analyse des risques.



Figure 2. La plateforme MYRTE à Ajaccio, France et la Greenergy Box installée sur cette plateforme

3. Les méthodes d'analyse des risques

Il existe beaucoup de méthodes d'analyse des risques (et beaucoup de variantes). Elles se différencient surtout par leur finalité (estimer la fiabilité, évaluer les conséquences d'une dérive, rechercher les causes d'une panne, identifier des dangers, choisir des parades contre un accident spécifique...) mais, isolément, ne suffiraient pas à atteindre l'objectif. Un « package » est nécessaire.

En effet, il n'existe pas une seule et unique méthode pour mesurer et estimer les risques mais plutôt un large choix d'outils et de méthodes tels que l'analyse primaire des risques, l'AMDEC ou les nœuds papillon. Cela mène à différents types d'approche pour la maîtrise des risques (Bouissou and Farret, 2006) (Debray, 2006).

Premièrement, l'approche déterministe où les scénarios (par exemple une fuite) sont imposés et correspondent souvent au pire cas (rupture guillotine d'une canalisation par exemple). Ces scénarios peuvent résulter d'un brainstorming de type HAZOP ou What-if ou peuvent être imposés par les autorités. Seules les conséquences des scénarios sont estimées sur plusieurs cibles comme les personnes, l'environnement et/ou les installations. Les résultats d'une approche déterministe sont facilement communicables au public mais peuvent donner une vision erronée du risque car cette méthode se focalise sur des accidents catastrophiques mais très hypothétiques.

Ensuite, l'approche probabiliste est souvent considérée comme l'opposé de l'approche déterministe. Dans cette approche, les scénarios sont identifiés via un brainstorming et sont classés selon leurs probabilités. Seuls les scénarios suffisamment probables et pouvant créer un danger significatif sont retenus. Cependant ce type d'approche ne reflète pas la réalité ou les efforts de gestion du risque pris par l'opérateur. Les résultats d'une approche probabiliste, appelés risque sociétal, sont peu communicables car ils sont difficilement compréhensibles par le public. Seuls les scénarios les plus probables sont considérés comme les plus caractéristiques.

Ces deux approches ; probabiliste et déterministe ; sont basées sur 3 étapes : identification ; évaluation et hiérarchisation des scénarios.

Historiquement chaque secteur industriel développa ses propres outils de gestion du risque basés sur leurs cultures spécifiques. Par exemple, la méthode HAZOP fut développée pour la gestion des procédés chimiques alors que les méthodes utilisant des arbres ont été développées pour le secteur aéronautique. Toutes ces méthodes sont autant d'outils pour guider la réflexion de manière plus automatique.

Parmi les « packages » possibles (Mads-MoSAR, QRA...), la méthode ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries) (Delvosalle, 2006) présente le bon profil notamment par son caractère relativement démonstratif et son orientation maîtrise des risques à travers l'approche « barrières de sécurité ». Des adaptations assez significatives ont néanmoins été apportées notamment pour affiner l'étude des scénarios et l'efficacité des barrières hors du contexte risque majeur dans lequel la méthode ARAMIS a été mise au point.

4. La méthode dérivée d'ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries)

Le projet ARAMIS proposait de classer et dans une certaine mesure de standardiser les méthodes d'évaluation des risques existantes afin de rejoindre les recommandations de la directive SEVESO II et de constituer une réponse alternative aux méthodologies purement déterministes ou purement probabilistes dont les faiblesses avaient été mises en évidence lors du projet ASSURANCE (Hourtolou, 2002).

La méthode ARAMIS est basée sur une approche par barrières : identification de tous les scénarios d'accidents majeurs concevables et inventaire de tous les équipements et barrières de sécurité empêchant le développement d'un accident et parce que l'acceptation finale passe par la démonstration que le bon dimensionnement des barrières de sécurité est capable de garder les risques identifiés sous contrôle. De plus une évolution significative du « risque perçu / culture de la sécurité » est reconnu :

- La vision irréaliste du « risque zéro » cachée derrière les approches déterministes est exclue ;
- La prise de décision est maintenant transparente puisqu'une ligne est tracée entre les accidents acceptables et inacceptables ;
- Le management de la sécurité est possible puisque non seulement les performances techniques des barrières sont prises en compte mais aussi leur fiabilité ce qui inclut les facteurs humains et organisationnels et implique des responsabilités

La méthode proposée dans ce projet est composée de deux méthodes (Figure 3) ; l'une permettant d'identifier l'ensemble des scénarios d'accidents envisageables et l'autre permettant de sélectionner les scénarios critiques qui feront l'objet d'un traitement plus poussé.

La méthode d'identification des scénarios est composée de trois étapes :

1. La sélection des substances/gaz potentiellement dangereux présents sur l'installation en fonction de leurs propriétés (inflammable/explosive, oxydante ...) ou de leurs conditions d'utilisation (sous pression par exemple).
2. Parmi toutes ces substances, l'identification des équipements potentiellement dangereux qui peuvent être définis comme tout équipement utilisant l'une ou plusieurs substances dangereuses ou étant sous pression.
3. La sélection de l'évènement critique aussi appelé évènement redouté central. D'après la méthode ARAMIS, l'évènement redouté central est défini comme étant une perte de confinement et le terme source pour le calcul des conséquences.

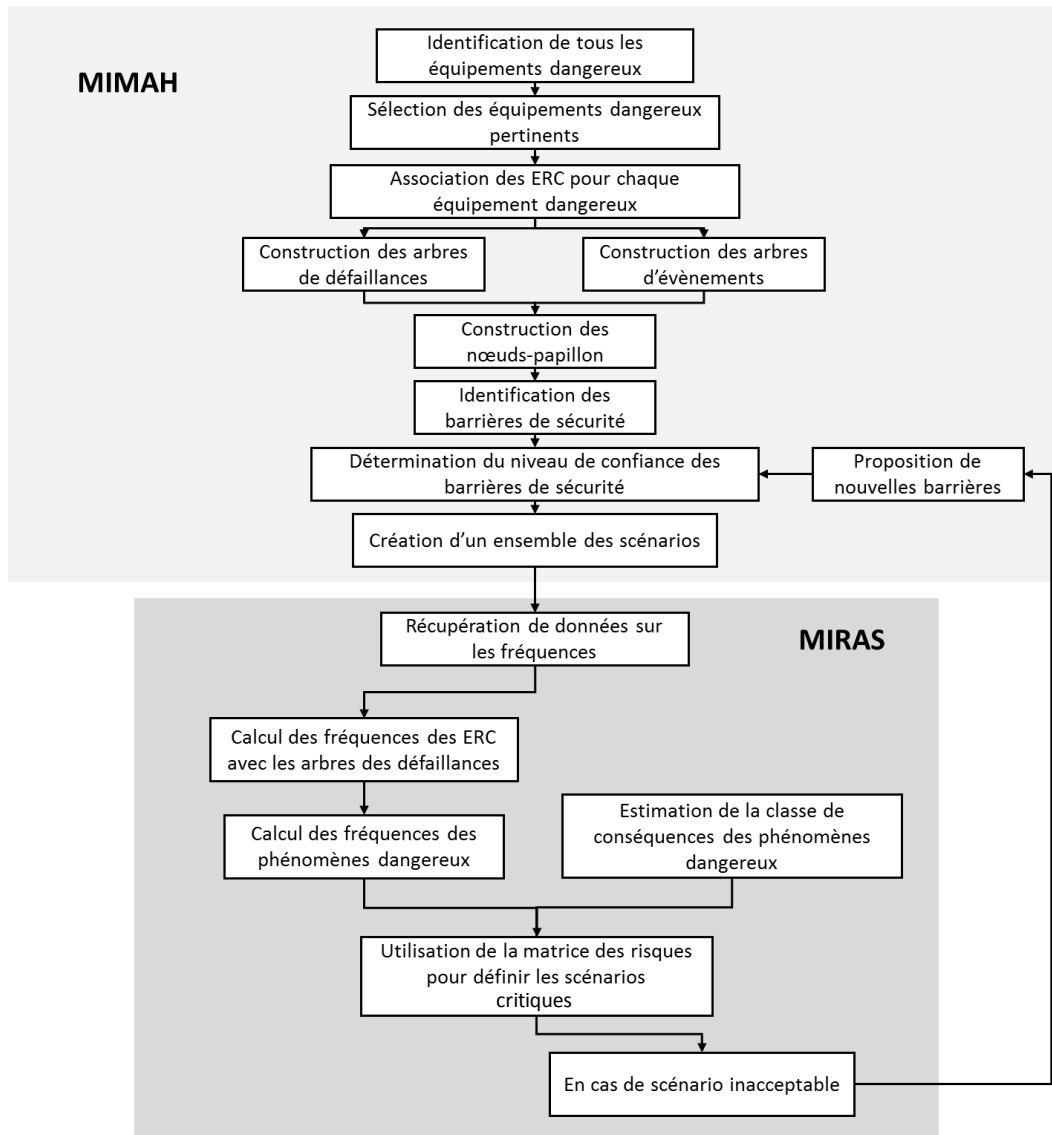


Figure 3. Vue d'ensemble dérivée de la méthode ARAMIS et adaptée aux objets hydrogène (MIMAH (Methodology for Identification of Major Accident Hazards – Méthodologie d'identification des dangers des accidents majeurs) et MIRAS (Methodology for the Identification of Reference Accident Scenarios – Méthodologie pour l'identification des scénarios d'accidents « référents »))

Pour chaque évènement critique, un nœud papillon est associé composé d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'évènements. Un exemple de nœud papillon est donné ci-dessous (Figure 4). Les nœuds papillon ont été choisis à cause de leur puissant pouvoir de communication et particulièrement la visualisation de toutes les causes et leurs relations (les conditions « et » nécessaires et « ou » suffisantes) permettant les futurs calculs des probabilités et l'identification de barrières de sécurités potentielles.

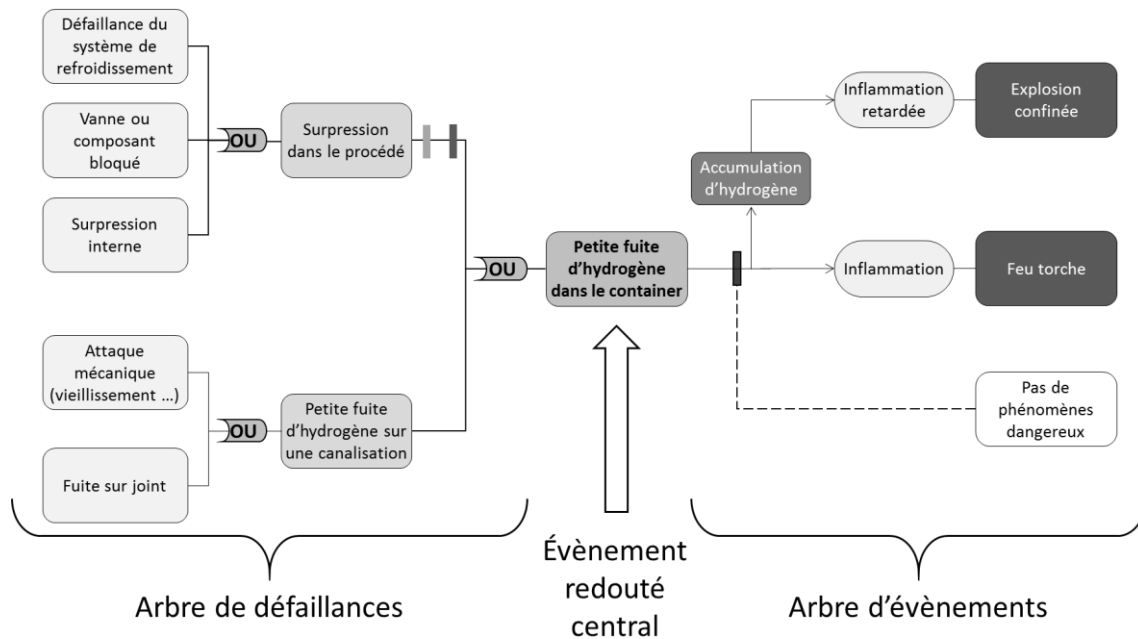


Figure 4. Nœud-papillon du scénario « Petite fuite d'hydrogène dans le container »

A ce stade l'identification des « événements redoutés centraux » (Laurent, 2011) est un point essentiel pour la suite de l'analyse de risques. Dans le cas des objets hydrogène l'évènement redouté central est principalement des fuites et plus accessoirement des éclatements de capacité. Le choix de l'ERC est primordial pour la suite car il sert à la fois pour le calcul des probabilités comme étant l'évènement ultime d'une série d'évènements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effets mais également pour le calcul des conséquences en devenant le terme source pour les calculs des effets.

Une fois la probabilité de l'ERC connue/calculée, on considère que dès lors que l'ERC s'est produit la séquence d'évènements qui suit est jugée inexorable, automatique sans relation de cause à effet entre les évènements mais suivant une séquence temporelle. La probabilité de l'accident est donc celle de l'ERC.

Dans le cadre du risque majeur, où la précision des estimations requise est moyenne, on utilise des bases de données génériques relatives aux accidents majeurs. On a montré (Duclos, 2015) que ces bases de données, plutôt anciennes (données établies lors des années 70) et relatives aux technologies des hydrocarbures et/ou des plateformes offshore, ne sont pas adaptées ni à la finesse de l'outil ni aux objets hydrogène. Comme par ailleurs le retour d'expérience sur ces objets est très limité pour être utilisé seul, on a développé une approche nouvelle basée sur le prolongement vers l'amont des arbres de défaillances. C'est pour cela qu'un effort tout particulier doit être également fait sur les probabilités d'occurrence des évènements de base. Pour remédier à cette limitation des données, il est envisagé de développer / « remonter » les arbres de défaillances de deux à trois niveaux au-dessus de l'évènement redouté central afin de déterminer des fréquences plus précises. Cependant certaines probabilités d'évènements de base sont difficilement quantifiables et le choix a été fait de s'inspirer de techniques fiabilistes afin de déterminer les probabilités de ces évènements de base.

Par ailleurs une même remarque peut être faite au sujet de l'évaluation des conséquences ; les méthodes d'estimation des conséquences des accidents habituellement employées pour les accidents majeurs ne sont pas adaptées. Il faut être capable notamment d'estimer assez précisément les caractéristiques d'un nuage inflammable (volume, concentration, gradient ou non, turbulence...) d'une part pour prédire les effets de l'explosion mais aussi pour dimensionner les barrières (événements, limiteurs de débit...). Une boîte à outil spécifique a été développée pour cela.

Cette boîte à outil permet à la fois de calculer la probabilité d'occurrence d'un scénario d'accident et de calculer depuis le terme source de cet accident la croissance du nuage dans une boîte (close ou non), d'en déterminer la concentration et le niveau de turbulence et le niveau de surpression en cas d'inflammation de cette atmosphère explosive.

La suite de l'analyse des risques passe par la conception d'une matrice d'acceptabilité qui comporte une dimension probabilité de l'accident et gravité de l'accident. Au sujet des classes des conséquences une table spécifique (Table 2) à AREVA Stockage d'Energie est présentée où le critère principal est les limites du container mais la matrice pourrait être constituée sur la base de critères différents ;

Table 2. Définition des classes de conséquences utilisées dans le cas d'un objet hydrogène containerisé type Greenergy Box.

Rang	Définition
C1	Les phénomènes dangereux du scénario d'accident entraînent peu d'effets de surpression ou thermique (20 mbar ou 1,6 kW/m ²) dans le container n'endommageant pas le système ainsi le système reste fonctionnel
C2	Les phénomènes dangereux entraînent des effets modérés (50 mbar ou 3 kW/m ²) à important (140 mbar ou 5 kW/m ²) dans le container. Cependant peu d'effets (20 mbar ou 1,6 kW/m ²) sont recensés en dehors du container. Il n'y a pas de risques de projectiles ou de flamme à l'extérieur du container. Dans ce cas le système est endommagé et doit être mis à l'arrêt.
C3	Les phénomènes dangereux entraînent des effets importants (140 mbar ou 5 kW/m ²) dans le container et modérés (50 mbar ou 3 kW/m ²) à l'extérieur du container. Il y a un risque qu'une flamme se développe à l'extérieur du container sans impacter des opérateurs. On considère qu'il y a un risque de blessures à l'extérieur du container.
C4	Les phénomènes dangereux entraînent des effets importants à l'extérieur du container pouvant mener à des effets dominos (200 mbar ou 8 kW/m ²). Il y a un risque de projectiles et de la création d'une onde de choc à l'extérieur du container. On considère que le container s'éventre dans ce cas.

Pour les classes de probabilités, celles utilisées couramment pour les accidents majeurs (5 classes de probabilités de A à E ou de 10⁻² à 10⁻⁵ par an) ne peuvent être utilisées dans notre étude car les quantités mises en jeu dans les objets hydrogène sont souvent très en dessous du seuil de déclaration. Pour refléter que les objets hydrogène sont davantage concernés par le risque ATEX que par le risque accident majeur, en effet un objet hydrogène seul ne peut pas mener à un risque majeur, d'autres classes de probabilités seront utilisées, elles sont présentées dans la Table 3.

Il y a un risque ATEX dès qu'une atmosphère explosive est présente quelques heures par an cependant un objet hydrogène tel que la Greenergy Box a une durée de fonctionnement supérieure à 1000 h par an. Le risque ATEX sur un objet hydrogène a une probabilité au minimum de 10⁻³ par an ce qui correspond à la classe de probabilité F3. Pour le risque d'effets dominos issus d'un objet hydrogène, on considère que la probabilité doit être au minimum de 10⁻⁵, ce qui correspond à la classe de probabilité F5.

Table 3. Définition des classes des probabilités utilisées dans le cas d'un objet hydrogène

Rang	Estimation Quantitative (par an)
F5	Inférieur à 10^{-4}
F4	10^{-3} à 10^{-4}
F3	10^{-2} à 10^{-3}
F2	10^{-1} à 10^{-2}
F1	10^0 à 10^{-1}
F0	Supérieur à 10^0

La matrice d'acceptabilité des risques est divisée en quatre zones : Pas d'exposition ; Exposition acceptable au seuil du risque ; Exposition limite au seuil du risque et Exposition inacceptable au seuil du risque. Cette matrice (Figure 5) a été conçue en positionnant d'abord les expositions limites qui correspondent aux liens entre les probabilités et les seuils proposés suivant :

- Le risque de décès individuel dans la vie quotidienne (maladie, accident) de 10^{-4} /an à 10^{-3} /an (source INSEE) à rapprocher du Seuil des Premiers Effets Létaux (SPEL)
- Le risque d'un arrêt temporaire d'activité quotidienne (suite à une maladie ou à un accident) de 10^{-2} /an à 10^{-1} /an (source assureurs) à rapprocher du Seuil des effets irréversibles (SEI)
- Le risque de se blesser sans la nécessité d'arrêt temporaire d'activité de l'ordre de 10^0 /an au moins (estimation) à rapprocher de l'activité quotidienne au travail

Néanmoins il est nécessaire de pondérer ces probabilités d'un facteur 0,1 à 0,01 car le risque « subi » est considéré comme étant professionnel et non de la vie quotidienne. Cette pondération est déjà présente dans la définition des seuils (SEI, SPEL...) ; par exemple pour le SPEL, seul 1% des personnes exposées à ce niveau peut décéder.

Ces couples probabilités/seuils sont représentés par les cases gris foncé dans la matrice d'acceptabilité. Cela correspond à la zone « Exposition limite au seuil du risque ». Les cases de la colonne correspondante à un seuil donné et situées au-dessus de la case gris foncé sont remplies en noir et correspondent à la zone où le risque est inacceptable. Les cases immédiatement en dessous et à gauche de chaque case gris foncé sont remplies en gris clair ainsi que celle qui pourraient être en contact direct avec une case noire. Ces cases gris clair correspondent à un risque faible et acceptable. Le reste de la matrice est remplie en blanc et correspond à la zone de non exposition.

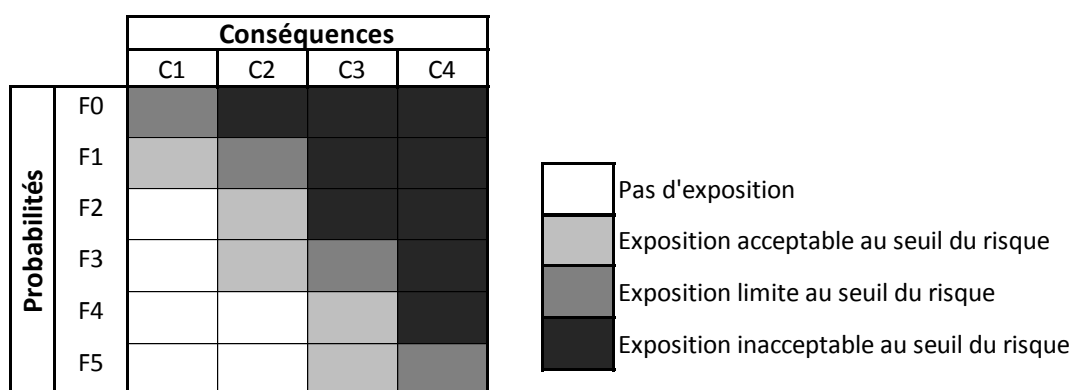


Figure 5. Matrice d'acceptabilité des scénarios accidentels identifiés sur l'objet hydrogène Greenergy Box

Les scénarios critiques sont les phénomènes dangereux localisés dans la zone gris foncé correspondant aux expositions limites au seuil du risque. Pour chaque RAS identifié, une analyse plus poussée devra être réalisée.

Les scénarios jugés comme acceptables doivent être dans les zones gris clair ou blanche. Tous les scénarios dans une case noire sont considérés inacceptables. Dans ce cas un effort tout particulier devra être réalisé pour faire évoluer le procédé (conception ou barrières de sécurité) et ré-estimer le risque.

4. Conclusion

Depuis quelques années, l'hydrogène apparaît comme un vecteur d'énergie crédible. AREVA Stockage d'Énergie développe, dans ce cadre, des solutions de stockage d'énergie, permettant de transformer l'énergie électrique en énergie chimique (de l'hydrogène) afin de la stocker. Sur ce type d'objets, le risque « hydrogène » est principalement constitué des scénarios d'explosion et d'incendie (« feux torches ») dont l'origine est la plupart du temps une fuite.

La sécurité est donc l'enjeu essentiel et ne doit pas être un verrou pour l'introduction et le développement des objets hydrogène sur le marché. Pour cela, une démonstration de maîtrise des risques est à faire qui permet de quantifier à la fois la probabilité de survenue du risque (une fuite) et ses conséquences.

Dans l'hypothèse où ce risque serait inacceptable pour l'utilisateur (trop grande proximité avec des enjeux forts, un environnement sensible...), il faut être capable de faire évoluer le procédé proposé puis de requalifier le risque. L'objectif de ce travail est de constituer l'outil qui permette de faire cela. On vise en quelque sorte un outil d'ingénierie de la sécurité.

L'objectif de ce travail est de constituer une méthode d'analyse des risques adaptée aux objets hydrogène et qui est en quelque sorte un outil d'ingénierie de la sécurité.

Une méthode d'analyse des risques dérivée de celle développée lors du projet ARAMIS a été utilisée pour identifier les scénarios accidentels car elle est démonstrative et permet de d'incorporer et de prendre en considération les barrières de sécurité. Cette méthode d'analyse des risques propose une méthodologie systématique d'identification et de sélection des scénarios d'accidents tout en prenant en considération les barrières et équipements de sécurité.

Les principaux points sur lequel ce travail a porté sont les suivants :

- Identification des « événements redoutés centraux » : dans le cas des objets hydrogène l'évènement redouté central ou ERC sera principalement des fuites et plus accessoirement des éclatements de capacité. L'ERC est l'évènement ultime d'une série d'évènements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Sur cet enchaînement des calculs de probabilité sont possibles. Dès lors que l'ERC s'est produit la séquence d'évènements qui suit est jugée inexorable, automatique sans relation de cause à effet entre les évènements mais suivant une séquence temporelle. La probabilité de l'accident est donc celle de l'ERC ;
- Calcul du risque : pour chaque ERC, un arbre de défaillances est construit en amont de l'ERC et un arbre d'évènements en aval. L'architecture de l'arbre de défaillances permet de calculer la probabilité de l'ERC si la probabilité des évènements les plus en amont est connue. Dans le cadre du risque majeur, où la précision des estimations requise est moyenne, on utilise des bases de données génériques relatives aux accidents majeurs. On a montré que ces bases de données, plutôt anciennes et relatives aux technologies des hydrocarbures, ne sont pas adaptées ni à la finesse de l'outil ni aux objets hydrogène. Comme par ailleurs le retour d'expérience sur ces objets est très limité, on a développé une approche nouvelle basée sur le prolongement vers l'amont des arbres de défaillances. Par ailleurs les méthodes d'estimation des conséquences des accidents habituellement employées pour les accidents majeurs ne sont pas adaptées. Il faut être capable notamment d'estimer assez précisément les caractéristiques d'un nuage inflammable d'une part pour prédire les effets de l'explosion

mais aussi pour dimensionner les barrières (événements, limiteurs de débit...). Une boîte à outil spécifique a été développée pour cela et des essais sont en cours afin d'apporter de nouveaux éléments sur la propagation d'une flamme dans un nuage d'hydrogène turbulent ;

- Conception d'une matrice d'acceptabilité : elle comporte une dimension probabilité de l'accident et gravité de l'accident. Le cas spécifique d'AREVA Stockage d'Energie est présenté mais la matrice pourrait être constituée sur la base de critères différents. Les classes de probabilités ont été choisies en fonction de la géométrie de l'installation et celle de probabilités afin de refléter le risque ATEX. La matrice d'acceptabilité a été créée autour de couples probabilités/seuils clés à la zone d'exposition limite au risque.

Références

- Bouissou, C., Farret, R., Programme EAT-DRA34-Opération j-Intégration de la dimension probabiliste dans l'analyse des risques, Partie 1 : Principes et pratiques, INERIS Report n°46036 (DRA-34), 2006
- Debray, B., Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle – Ω 7, INERIS Study Report n°DRA-2006-P46055-CL47569, 2006
- Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., Debray, B., ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scénarios in process industries. *J. of Hazardous Materials*, 130, 2006, pp 200–219
- Duclos, A., Proust, C., Daubech, J., Verbecke, F. Engineering safety in hydrogen-energy applications, ICHS 6, Octobre 2015, Yokohama, Japon
- Hourtoulou, D., Analyse des risques et prévention des accidents majeurs – ASSURANCE; Assessment of the Uncertainties on Risk Analysis of Chemical Establishments – Rapport final 2002 INERIS (DRA-007)
- Laurent, A. Sécurité des procédés - Connaissances de base et méthodes d'analyse des risques, 2ième Edition, Lavoisier, Ed.Tec & Doc, Collection Génie de Procédés de l'Ecole de Nancy, ISBN 978-2-7430-1396-7, Paris, 2011.
- Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne, Directive 2012/18/EU du Parlement Européen et du Conseil du 4 juillet 2012 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, modifiant puis abrogeant la directive 96/82/CE du Conseil. *J. officiel de l'Union Européenne*, 24/07/2012
- Verbecke, F., Vesly, B., Safety strategy for the first deployment of a hydrogen-based green public building in France, *Int. J. of Hydrogen Energy* 2013, 38 (19), pp. 8053-8060

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier AREVA Stockage d'Energie pour le financement de ce projet et l'accès aux données techniques de la Greenergy Box.