



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH Ouargla  
INSTITUT DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE APPLIQUEE



Mémoire de

## LICENCE PROFESSIONNELLE

**Domaine** : science et technique

**Filière** : Hygiène et Sécurité Industrielle

**Spécialité** : Hygiène et Sécurité et Environnement

**Présenté par :**

- BETTAYEB Soufiane
- GHOUH Mahmoud Yacine

### Thème

---

*Analyse des risques de système de production  
d'hydrogène*

*Etude de cas Linde gas Skikda*

---

Soutenu publiquement le 07/07/2019 devant le jury :

Mr. BOULAJOUL Younes	M.A.A	Université d'Ouargla	Président
Mr. NEGROU Belkhir	M.C.A	Université de Ouargla	Encadreur
Mr. HADEF Hefaidh	M.A.A	Université de Ouargla	Examineur

**Année universitaire : 2018 / 2019**

---

*DÉDICACE*

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon très cher frère KHALED.*

*Et tous mes frères et sœurs.*

*A toute la famille Bettayeb.*

*A mes tantes et oncles.*

*A tous mes amis Amor, Nadir, Moumen, Hamid*

*A tous ceux que j'aime.*

*M. Bettayeb Soufiane*

---

*DÉDICACE*

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon très chère ma mère et mon père.*

*A mes frères et sœurs.*

*A mes tantes et oncles.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux que j'aime.*

*M. Ghoul Mahmoud Yacine*

---

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à finir ce modeste travail. Nous tenons à remercier notre institut IT pour cette formation intéressante, et leur directeur Mr. NEGROU Belkhir et notre encadreur eu même temps, en espérant qu'il trouve dans ce mémoire l'expression de notre estime et de notre respect les plus profonds.*

*Nos remerciements s'adressent également à Mr. HADEF Hefaidh pour sa générosité et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques et nos félicités pour ton doctorat.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre reconnaissance à Mr. SELLAMI Ilyas pour ses conseils son aide et encouragements. Nous remercions aussi les doctorants Mr. MESSAOUDI Djilali et Mr. CHETOUANE Amine pour leurs efforts dans la réalisation de ce travail, et nous n'oublierons pas l'ensemble des enseignants d'IT pour leur aide et leur soutien au cours de la formation pédagogique.*

*Nous exprimons notre gratitude sur le directeur de Linde gas Skikda Mr. MEHDI Salah Eddine Boughaba et Mr. SAHRAOU Mouhamed avec les travailleurs du l'atelier hydrogène rencontrés lors de notre stage pratique et qui ont accepté de répondre à nos questions avec gentillesse.*

*Enfin nous aimerions remercier tous nos amis et nos collègues pour leur amitié, leur soutien, et à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail, et tous ceux qui se sont intéressés à notre mémoire.*

---

---

## *TABLE DES MATIÈRES*

---

	Page
DÉDICACE	II
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I Chapitre I Présentation général sur la chaîne de production d'hydrogène et les risques liés sur ce Chain, avec une généralité sur le processus de gestion des risques .....	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Chaîne de production d'hydrogène.....	3
I.2.1 La production.....	3
I.2.2 Stockage .....	6
I.2.3 Transport.....	7
I.2.4 Distribution.....	8
I.3 Les risques liés à la Chain logistique d'hydrogène.....	10
I.3.1 Des risques de niveaux de criticité élevés .....	10
I.3.2 Des risques de niveaux de criticité a priori faibles .....	10
I.3.3 Les risques liés à la production.....	11
I.3.4 Les risques liés au transport.....	11
I.3.5 Les risques liés au stockage.....	12
I.3.6 Risques associés à la distribution dans les stations-service.....	13
I.4 La Gestion Des Risques .....	14
I.4.1 Principes pour la gestion des risques .....	14
I.5 Analyse dysfonctionnelle : la méthode (HAZard and Operability) .....	16
I.6 Conclusion .....	17
II Chapitre 2 : Présentation d'historique de l'entreprise et le processus de production d'hydrogène de linde gas skikda .....	
II.1 Introduction.....	19
II.2 Présentation des entreprises .....	19
II.2.1 GI/LINDE (GROUPE INDUSTERILE LINDE) .....	19

II.2.2	GI/LINDE Hassi Messoud .....	20
II.2.3	GI/LINDE SKIKDA.....	22
II.3	Présentation de système étudié .....	26
II.3.1	Présentation d’atelier d’hydrogène.....	27
II.4	Identification des risques dans l’atelier d’hydrogène .....	38
II.4.1	L’analyse des risques par l’application de la méthode HAZOP.....	38
II.5	Modélisation d’une rupture catastrophique sur le ballon de stockage H <sub>2</sub> .....	44
II.6	Conclusion .....	49
III	Chapitre 3 Etude perspective pour la transition a l’utilisation d’hydrogène comme énergie en Algérie.....	
III.1	Introduction .....	50
III.2	Transition énergétique.....	50
III.3	Pourquoi prépare le pré pétrole en Algérie .....	51
III.3.1	Energie Solaire Photovoltaïque .....	52
III.3.2	Energie Solaire Thermique.....	53
III.3.3	Energie Eolienne.....	53
III.4	Motivation pour l’hydrogène comme une alternative énergétique .....	53
III.5	Potentialité de production d’hydrogène à partir des énergies renouvelable.....	54
III.5.1	Production de l’hydrogène.....	54
III.5.2	Production H <sub>2</sub> à partir d’électricité photovoltaïque .....	55
III.5.3	Production de H <sub>2</sub> à partir d’électricité éolienne.....	55
III.6	Choix de site favorable de production l’hydrogène en Algérie à partir des énergies renouvelables.....	56
III.6.1	Production H <sub>2</sub> à partir d’électricité photovoltaïque.....	57
III.6.2	Production de H <sub>2</sub> à partir d’électricité éolienne.....	57
III.7	Types de station-service à hydrogène .....	58
III.7.1	Conception de station-service hydrogène.....	60
III.7.2	Véhicules à hydrogène.....	61
III.7.3	Quelques applications réelles dans le monde .....	62
	CONCLUSION GÉNÉRALE .....	65
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	66
	ANNEXE .....	68
	RÉSUMÉ .....	72
	ABSTRACT .....	72

---

## *LISTE DES TABLEAUX*

---

Tableau II-1 : données technique de l'installation.....	20
Tableau II-2 : composition de l'air.....	21
Tableau II-3 : Tableau II 3 : présentation générale du projet.....	25
Tableau II-4 : dimension de réservoir d'hydrogène.....	37
Tableau II-5 : l'identification des risques liés aux équipements de l'atelier hydrogène.....	38
Tableau II-6 : données d'entrée pour PHAST.....	44
Tableau II-7 : seuils des effets de surpressions sur l'homme sur la structure.....	45
Tableau II-8 : seuils des effets thermiques sur l'homme et sur la structure.....	45
Tableau II-9 : Distance de concentrations dans la direction du vent.....	46
Tableau II-10 : diamètre de la boule de feu.....	47
Tableau II-11: distance d'effet surpression de chaque seuil.....	48

---

## *LISTE DES FIGURES*

---

Figure I-1 : cellule d'électrolyse de l'eau.....	5
Figure I-2 : processus de la gestion du risque [9].....	14
Figure I-4 : les étapes de la méthode HAZOP [17].....	17
Figure II-1 : plan d atelier hydrogène.....	26
Figure II-2 : écran de contrôle de l'électrolyseur.....	27
Figure II-3 : cellule d'électrolyse.....	28
Figure II-4 : organigramme de gaz.....	29
Figure II-5 : organigramme d'hydrogène.....	31
Figure II-6 : commutateurs de niveau.....	31
Figure II-7 : remplisseur du volume.....	32
Figure II-8 : épurateur de gaz (rincer).....	32
Figure II-9 : l'échangeur de chaleur.....	33
Figure II-10 : le filtre-fusion.....	33
Figure II-11 : réservoir de coupure.....	34
Figure II-12 : système de refroidissement d'électrolyte.....	35
Figure II-13 : écran de contrôle de système de purification d'hydrogène.....	36
Figure II-14 : réservoir de stockage d'hydrogène.....	37
Figure II-15 : zone d'effet thermique de phénomène jet enflammée.....	46
Figure II-16 : zone d'effet thermique due à la boule de feu.....	47
Figure II-17 : distances d'effets de surpression.....	48
Figure III-1 : schéma de principe d'un couplage direct PV-électrolyseur [22].....	55
Figure III-2 : schéma de principe d'un couplage déporté PV-électrolyseur [22].....	55
Figure III-3 : schéma de principe d'un couplage déporté éolien -électrolyseur. [22].....	56
Figure III-4 : schéma de principe d'un couplage déporté éolien – électrolyseur. [22].....	56
Figure III-5 : potentiel d'hydrogène solaire. [23].....	57
Figure III-6 : potentiel d'hydrogène éolien. [23].....	58

Figure III-7 : modes de production d'hydrogène : (a) production décentralisée. (b) production centralisée.....	59
Figure III-8 : les éléments typiques d'une station- service hydrogène avec livraison de l'hydrogène. [24] .....	60
Figure III-9 : les éléments typiques d'une station-service avec production de l'hydrogène sur site. [24] .....	61
Figure III-10 : applications des piles à combustible par types de piles. [22] .....	62
Figure III-11 : principaux modèles des bus. [22] .....	64
Figure III-12 : les principaux modèles de véhicules individuels.....	64
Figure III-13 : Schéma simplifier sur le processus de production d'hydrogène ; pour (Linde gas Skikda). [Annexe] .....	68

---

### *LISTE DES ABRÉVIATIONS*

---

<b>ATR</b>	le reformage Autotherme
<b>PEM</b>	Proton Echange Membrane
<b>HAZOP</b>	HAZard and OPerability
<b>GI/LINDE</b>	Groupe Industriel Linde
<b>LGA</b>	Linde Gas Algérie
<b>MEA</b>	Mono Ethanol Amin
<b>HTU</b>	Hydrogène To User
<b>HTA</b>	Hydrogène To Atmosphère
<b>HTO</b>	Hydrogène Teneur Oxygène
<b>HySTAT</b>	Electrolyseur alcaline appelé HySTAT-A
<b>C.C</b>	Courant Contenu
<b>PCS</b>	Système de Commande de Propriété industrielle
<b>EPS</b>	Electrolyser Power Supply (alimentation d'énergie d'Electrolyseur)
<b>IMET</b>	Inorganique Membrane Electrolyse Technologie
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange membrane Fuel Cell
<b>ECME</b>	Équipement de Contrôle, de Mesure et d'Essa
<b>PTGS</b>	transmetteur de pression de commande
<b>ADF</b>	Anti Déflagrant
<b>ATEX</b>	Atmosphère Explosive



---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

*Les ressources fossiles représentent 80% de la consommation énergétique mondiale. Ces ressources sont limitées : 40 ans pour le pétrole, 60 ans pour le gaz et 150 ans pour le charbon. Beaucoup de pays producteurs ne sont pas politiquement stables. La combustion des ressources fossiles produit de l'énergie et du CO<sub>2</sub>. Par effet de serre, la présence de CO<sub>2</sub> dans la haute atmosphère induit une augmentation des températures (réchauffement climatique). De +0.6°C depuis 1861 et estimée à +1.5 à +4.5°C entre 2000 et 2050.*

*Dans ce contexte, l'hydrogène s'avère être un candidat très sérieux, même s'il ne constitue qu'un vecteur énergétique et non une ressource primaire. De plus, l'hydrogène peut apporter une réponse aux enjeux climatiques en permettant de rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables par nature dispersées et aléatoires. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Outre sa fonction de vecteur énergétique, est alors exploité son caractère stockable permettant d'une part, de s'affranchir du côté aléatoire de ces modes de production, et d'autre part, de répondre aux exigences fixées par les consommateurs d'énergie.*

*Par considération que l'hydrogène est un gaz léger, à forte diffusivité, extrêmement inflammable et présentant un domaine d'explosibilité étendu, ce qui en fait un produit réputé dangereux. Dans les conditions normales de température et de pression (15°C et pression atmosphérique), L'hydrogène est un gaz incolore, inodore, non toxique et non corrosif susceptible de générer en particulier, en cas de fuite présente des risques spécifiques de différents niveaux de criticité, on peut considérer des risques de niveaux de criticité élevés (incendie, explosion) et des risques de niveaux de criticité a priori faible (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique).*

*La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau considéré comme un mode parmi de plusieurs modes de production d'hydrogène, est une technique mature, basée sur un processus fondamentalement simple, est très efficace et ne comporte pas des pièces mobiles. Elle est destinée à la production d'hydrogène à grande échelle. L'efficacité de ce processus est de l'ordre de 72 % à 82 %, l'Algérie adapter cette technique à partir de l'année 2004 dans Linde gas Skikda, et comme toutes les techniques utilisées il y a des risques associés à ce processus.*

*Dans ce contexte, et compte tenu du fait que l'exploitation de cette source d'énergie est encouragée, industriels et chercheurs abordent la question de la sécurité de la chaîne de l'hydrogène. En effet, l'objectif d'une entreprise est de produire, mais la production en toute sécurité. Et par la présente mémoire de licence professionnelle, nous avons opté pour évaluer les risques associés à ce processus, nous avons identifié ces risques par l'application de la méthode HAZOP qui est parmi les méthodes d'analyse de risque qualitatif, et aussi la modélisation de l'évènement plus critique « catastrophique rupture » retenus après l'application de la méthode HAZOP par le logiciel PHAST pour déterminer les distances d'effets thermique et de surpression.*

*Le mémoire est constitué de trois chapitres :*

- ✓ *Le premier chapitre présente une généralité sur la chaîne de production d'hydrogène (production, transport, distribution, stockage), et les risques liés sur ce Chain, avec une généralité sur le processus de gestion des risques. Ensuite,*
- ✓ *le deuxième chapitre entame une présentation d'historique de l'entreprise depuis sa création jusqu'à la coopération avec les allemands en 2007 pour créer l'entreprise LGA, dans le même chapitre nous avons présenté en détail le processus de production d'hydrogène adopté par le groupe Linde gas Skikda (électrolyse d'eau).*
- ✓ *Le troisième chapitre présente une étude prospective pour la transition à l'utilisation d'hydrogène comme énergie en Algérie à partir des énergies renouvelables.*

# I Chapitre I

Présentation général sur la chaine de production d'hydrogène (production, transport, distribution, stockage), et les risques lies sur ce Chain, avec une généralité sur le processus de gestion des risques

## I.1 Introduction

*La production d'énergie au niveau mondial et en Algérie fait une importance majeure, dans les dernières années, la tendance internationale à transfert vers les énergies renouvelables comme par exemple la production d'hydrogène et énergie photovoltaïque...*

*Dans cette étude, nous avons choisi de réaliser une étude sur l'énergie d'hydrogène car, c'est la forme d'énergie en cours de développement en Algérie, et le souci majeur et le défi pour cette forme d'énergie, c'est comment produire, transporter, stocker et exploiter ce type d'énergie en toute sécurité.*

*Par le présent chapitre, nous avons rappelé d'un part, les différents types d'énergie d'hydrogène, et d'autre part, nous avons présenté les principes de gestion de risque et la méthode que nous avons choisie pour réaliser notre étude c'est la méthode HAZOP.*

## I.2 Chaîne de production d'hydrogène

Chaîne de production d'hydrogène consiste plusieurs étapes, et aussi, différentes méthodes. Nous allons les mentionner brièvement.

### I.2.1 La production

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, la molécule de dihydrogène n'est pas un produit naturellement disponible, bien que l'atome d'hydrogène entre dans la composition chimique de différents corps comme le méthane, l'eau, ou toute matière organique. Les méthodes de production de l'hydrogène sont différentes selon les énergies primaires et la source d'énergie :

#### I.2.1.A Production par les combustibles fossiles

##### A. Production à partir du gaz naturel

L'hydrogène est actuellement produit à partir du gaz naturel au moyen de trois processus chimiques différents :

- Vaporeformage : le vaporeformage ou reformage à la vapeur, consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec de la vapeur d'eau et en présence d'un catalyseur à base de nickel, à haute température (840 à 950 °C) et à pression modérée (20 à 30 bar). [1]
- Oxydation partielle (POX) : l'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur.
- Reformage autotherme (ATR) : le reformage Autotherme (ou ATR) est un procédé particulièrement intéressant. On l'utilise essentiellement sur gaz naturel. Il est basé sur l'association, au sein d'un même réacteur, d'une oxydation partielle à l'oxygène pur, suivie d'une zone catalytique de vaporeformage.

## **B. Gazéification du charbon**

Cette technique fut la source principale de production d'hydrogène avant le reformage, mais elle n'est plus aujourd'hui qu'utilisée en Afrique du Sud et en Chine. Elle n'est en effet intéressante que lorsque les prix du pétrole et du gaz sont trop élevés. Son principe repose sur le mélange du charbon avec de l'eau et de l'air à 1000°C et sous haute pression, ce qui permet d'obtenir un gaz contenant en majorité du CO et de l'hydrogène.

## **C. Production à partir du nucléaire**

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4<sup>ème</sup> génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 %.

### **I.2.1.B Production à partir du nucléaire**

L'hydrogène peut être produit à partir de biomasse par un procédé de pyrolyse/gazéification. L'étape de préparation de la biomasse inclut le chauffage de la boue de la biomasse/eau à haute température sous pression dans un réacteur. Ce processus se décompose et oxyde partiellement la biomasse, le produit de gaz composé d'hydrogène, méthane, CO<sub>2</sub>, CO et de l'azote. Matière minérale est retirée du bas du réacteur. Le flux de gaz va au réacteur de conversion à haute température où la teneur en hydrogène est augmentée. L'hydrogène très pur est produit dans l'unité d'adsorption modulée en pression ultérieure. Le système entier est très semblable à l'installation de gazéification du charbon, à l'exception de l'unité de prétraitement de la biomasse et la conception du réacteur. En raison de la plus faible valeur calorifique par unité de masse de la biomasse par rapport au charbon, les installations de transformation sont plus grandes de taille comparable à celle d'une installation de gazéification du charbon. [2]

### **I.2.1.C Production d'hydrogène à partir de la biomasse**

L'hydrogène peut être produit à partir de biomasse par un procédé de pyrolyse/gazéification. L'étape de préparation de la biomasse inclut le chauffage de la boue de la biomasse/eau à haute température sous pression dans un réacteur. Ce processus se décompose et oxyde partiellement la biomasse, le produit de gaz composé d'hydrogène, méthane, CO<sub>2</sub>, CO et de l'azote. Matière minérale est retirée du bas du réacteur. Le flux de gaz va au réacteur de conversion à haute température où la teneur en hydrogène est augmentée. L'hydrogène très pur est produit dans l'unité d'adsorption modulée en pression ultérieure. Le système entier est très semblable à l'installation de gazéification du charbon, à l'exception de l'unité de prétraitement de la biomasse et la conception du réacteur. En raison de la plus faible valeur calorifique par unité de masse de la biomasse par rapport au charbon, les installations de transformation sont plus grandes de taille comparable à celle d'une installation de gazéification du charbon. [2]

### **I.2.1.D Électrolyse**

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est une technologie mature, basée sur un processus fondamentalement simple, est très efficace et ne comporte pas des pièces mobiles. Elle est destinée à la production d'hydrogène à grande échelle. L'efficacité

de ce processus est de l'ordre de 72 % à 82 %. Plusieurs technologies avancées de l'électrolyseur sont développées telles que l'électrolyse alcaline avancée (qui sont utilisées de nouveaux matériaux pour les membranes et d'électrodes qui permettent une amélioration dans l'efficacité jusqu'à 90 %), le procédé polymère solide (SPE) (qui emploie une membrane changeuse d'ions conductrice protoniques comme électrolyte et comme une membrane qui sépare la cellule d'électrolyse) et l'électrolyse à haute température de vapeur (qui opère entre 700 °C et 1000 °C et qui emploie des céramiques d'ion – conduite d'oxygène comme électrolyte). Une installation d'électrolyse peut fonctionner sur une large gamme de facteurs de capacité et est pratique pour une large gamme de capacités de fonctionnement, ce qui rend ce processus intéressant pour un couplage avec des sources d'énergie renouvelables, en particulier avec le photovoltaïque (PV). Ce dernier génère la courante continue basse tension, qui est exactement ce qui est nécessaire au procédé d'électrolyse. [2]

- **Technologies de l'électrolyseur de l'eau**

L'électrolyse de l'eau ne représente actuellement que quelques pour-cent de la totalité de l'hydrogène produit. Néanmoins, comme elle est un mode de production a priori propre qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée, elle est de ce fait du plus haut intérêt pour des applications telles que les piles à combustible. Actuellement, des électrolyseurs de petite capacité, typiquement de 1 à 100 kW, sont développés, parallèlement à l'électrolyse industrielle à forte puissance (unités pouvant aller jusqu'à plusieurs mégawatts) utilisée en secours d'autres moyens de production d'hydrogène ou encore pour stocker les excédents d'électricité. L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique permettant, grâce à de l'énergie électrique, de décomposer de l'eau en hydrogène et oxygène, selon les deux réactions chimiques ayant lieu séparément à l'anode et à la cathode [3] :

- À l'anode :  $H_2O + \text{électricité} \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
- À la cathode :  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Les électrodes sont séparées par un électrolyte conducteur d'ions qui permet des transferts ioniques entre les électrodes. Au cours de ce procédé, l'énergie électrique apportée au système est transformée en énergie chimique sous forme d'hydrogène (voir la Figure I-1 : cellule d'électrolyse de l'eau.).

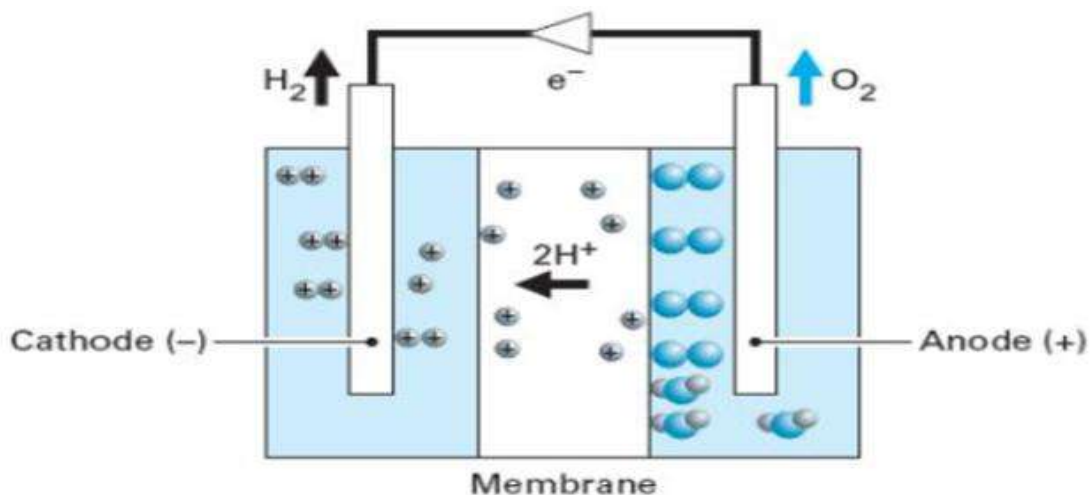


Figure I-1 : cellule d'électrolyse de l'eau.

Il existe trois technologies principales d'électrolyse : la technologie alcaline, la technologie PEM (Membrane Echangeuse de Protons) et les électrolyseurs à haute température. Ces différentes technologies diffèrent de par la nature de l'électrolyte utilisé et les températures de fonctionnement et en sont à des degrés de maturité différents :

- Electrolyseurs alcalins
- Electrolyseurs PEM
- Electrolyseurs à haute température

## **I.2.2 Stockage**

Une fois que l'hydrogène est produit, il doit être stocké afin de combler les écarts journaliers et saisonniers entre la disponibilité de sources d'énergie et de la demande. Plusieurs formes de stockage :

### **I.2.2.A Stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse**

Selon la taille de stockage et application, plusieurs types de systèmes de stockage d'hydrogène peuvent être disponibles. Cela inclut les grands systèmes de stockage stationnaires et les petits systèmes de stockage stationnaire à la distribution, ou au niveau de l'utilisateur final ; systèmes mobiles de stockage pour le transport et la distribution, y compris les deux périphériques de grande capacité (par exemple un pétrolier d'hydrogène liquide - vraquier) et petits systèmes (par exemple, une citerne de camion porte hydrogène sous forme liquide ou gazeuse) ; et les réservoirs de véhicules pour stocker l'hydrogène utilisé comme carburant pour les véhicules routiers. En raison de faible densité de l'hydrogène, son stockage toujours nécessite des quantités relativement importantes et est associé à des pressions élevées (ce qui nécessite de lourds vaisseaux) ou des températures extrêmement basses, ou combiné à d'autres matériaux (beaucoup plus lourd que l'hydrogène lui-même).

Aujourd'hui, les systèmes de stockage de gaz sous pression sont utilisés dans le business de gaz naturel dans diverses tailles et plages de pression, des cylindres de pression standard (50 l, 200 bar) à récipients stationnaires haute pression (plus de 200 bar) ou conteneurs sphériques basse pression (> 30 000 m<sup>3</sup>, 12-16 bar). Ce champ d'application sera similaire pour le stockage de l'hydrogène. [2]

### **I.2.2.B Stockage d'hydrogène sous forme liquide**

Les caractéristiques favorables de l'hydrogène liquide incluent son pouvoir calorifique élevé par unité de masse et de grande capacité de refroidissement dues à sa chaleur spécifique élevée. Certaines utilisations de l'hydrogène liquide sont importantes telles que le programme spatial, dans le domaine de la physique nucléaire et en chambres à bulles. Le transport de l'hydrogène est beaucoup plus économique lorsqu'il est sous forme liquide, même si la réfrigération cryogénique et les vases de Dewar spéciaux sont nécessaires. Bien que l'hydrogène sous forme liquide puisse fournir plusieurs avantages, ses utilisations sont limitées en partie parce que la liquéfaction de l'hydrogène par les méthodes traditionnelles consomme une grande quantité d'énergie (environ 30 % de son pouvoir calorifique). La liquéfaction de 1 kg d'hydrogène dans une centrale de taille moyenne nécessite 10 à 13 kWh d'énergie (électricité). En outre, ébullition arrêt pertes (boil-off losses) associées au stockage, transport, et manipulation d'hydrogène liquide peut consommer jusqu'à 40 % de son énergie de combustion disponibles. [2]



### I.2.2.C Stockage d'hydrure métallique

En présence de certains métaux et alliages, l'hydrogène peut former des hydrures métalliques. Au cours de ce processus, les molécules d'hydrogène sont séparées et des atomes d'hydrogène sont insérés dans des espaces à l'intérieur de treillis du métal ou alliage. Cela crée le stockage efficace comparable à la densité de l'hydrogène liquide. Toutefois, lorsque la masse de métal ou alliage est prise en compte, la densité de stockage gravimétrique d'hydrure métallique deviendrait alors comparable au stockage de l'hydrogène sous pression. La meilleure densité de stockage gravimétrique réalisable est environ 0,07 kg H<sub>2</sub>/kg de métal, pour un hydrure de haute température tel que MgH<sub>2</sub>. Au cours du processus de stockage (charge ou absorption), la chaleur est libérée, qui doit être enlevée afin de réaliser la continuité de la réaction. Durant le processus de libération d'hydrogène (décharge ou désorption), la chaleur doit être fournie dans le réservoir de stockage. [2]

### I.2.3 Transport

Le transport d'hydrogène entre un centre de production et un lieu d'utilisation ou de distribution s'opère de diverses manières selon la durée souhaitée de ce transfert, la masse d'hydrogène en jeu, la géographie des lieux considérés et les facteurs technico-économiques. [4]

#### I.2.3.A Transport par pipelines

Les pipelines ont été utilisés pour le transport de l'hydrogène depuis plus de 50 ans et aujourd'hui, il y a environ 16 000 km de pipelines d'hydrogène partout dans le monde qui alimente l'hydrogène aux raffineries et les usines chimiques dans plusieurs zones industrielles, Europe, Canada et les États-Unis d'Amérique. Des réseaux denses existent par exemple entre la Belgique, la France et les Pays-Bas, dans la région de la Ruhr en Allemagne, ou le long de la côte du Golfe aux États-Unis. Des pressions de fonctionnement typiques sont 1-3 MPa avec des débits de 310-8900 kg/h. Le plus long pipeline d'hydrogène dans le monde appartient à Air Liquide et s'étend de 400 km de Picardie à la Belgique. Les États-Unis ont plus de 720 km des pipelines d'hydrogène concentrés le long du côté du Golfe et les Grands Lacs. L'option la moins chère du transport de l'hydrogène est par pipeline de grande capacité, ce qui peut coûter moins de 0,1 \$ US/kg plus de 100 km. L'estimation du coût en capital de la transmission de l'hydrogène varie de 200 000 à 1 000 000 US \$/km de canalisations. [5]

#### I.2.3.B Transport routier ou ferroviaire

Les industriels livrent l'hydrogène par la route ou par rail, soit sous forme de bouteilles en acier contenant de l'hydrogène sous pression, soit sous forme cryogénique. Le stockage et la distribution d'hydrogène sous pression sont une pratique standard, depuis de très nombreuses années, avec des bouteilles ou assemblages de bouteilles cylindriques, en acier, gonflées à 20 ou 25 MPa (200 ou 250 bars). Les inconvénients de ce mode de stockage sont l'encombrement seulement 14 kg/m<sup>3</sup> à 20 MPa et à température ordinaire (21°C). D'où les travaux de développement d'une nouvelle technologie de stockage s'appuyant sur les progrès réalisés dans le domaine des réservoirs de type composite qui permettent de stocker l'hydrogène jusqu'à 700 bars. C'est ainsi qu'Air Product a présenté, en août 2014, un nouveau type de camion de livraison transportant de l'hydrogène sous 500 bars développé dans le cadre du projet européen FCH- JU baptisé HyTEC. [4]



### I.2.4 Distribution

Le jour où la voiture à hydrogène va devenir une réalité courante, la distribution, à l'instar de ce qui existe pour les carburants pétroliers, se devra de rendre l'hydrogène disponible en tout lieu, en toute sécurité, d'une manière commode et à un prix abordable. Il faudra pour cela relever un défi à la fois technologique et économique

#### I.2.4.A Technologies de la distribution de l'hydrogène en station-service

La distribution actuelle des carburants automobiles, si elle est une référence, n'est guère transposable au cas de l'hydrogène. Les carburants pétroliers sont liquides alors que l'hydrogène, dans sa forme la plus courante, est gazeux et, s'il est liquide, c'est à  $-253^{\circ}\text{C}$ , une température qui nécessite un excellent conditionnement cryogénique. Les hydrocarbures distribués aujourd'hui proviennent essentiellement du raffinage du pétrole extrait par l'exploitation de gisements localisés en certains points de la planète ; ils sont parfois enrichis en biocarburants. L'hydrogène, au contraire, peut être obtenu en tout lieu, à partir de toute forme d'énergie primaire, en particulier renouvelable. On peut le produire dans la station de distribution elle-même ou, s'il provient d'une production centralisée, l'approvisionner par route, par voie ferrée, par voie d'eau ou par gazoduc. Enfin, les installations de distribution d'hydrogène à prévoir sont fonction du mode de stockage à bord du véhicule, aujourd'hui essentiellement le gaz comprimé à 35 ou 70 MPa (350 ou 700 bars). [6]

##### A. Distribution d'hydrogène comprimé

Le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé est d'une technologie qui s'est répandue grâce aux progrès réalisés dans le domaine des réservoirs composites à 35 et 70 MPa. De plus, ce type de stockage étant relativement facile à mettre en œuvre. Pour cette distribution il existe deux possibilités :

- Transfert direct du gaz sous pression : À partir d'une réserve d'hydrogène comprimé dans la station : il se fait, selon le modèle de véhicule, à 35 MPa ou 70 MPa. Ce type de station avait été, en 1997, associé aux premières opérations de démonstrations des bus Ballard à Chicago et à Vancouver. Si la manipulation du gaz sous pression est, à ce jour, par faite ment maîtrisée, son transfert à répétition dans une station-service demande des aménagements particuliers. Alors qu'un liquide s'écoule aisément d'un récipient à l'autre, par gravité ou par l'action d'une pompe volumétrique, un gaz ne se déplace en grande quantité que lorsqu'une différence de pression notable – plusieurs MPa – est maintenue entre l'amont et l'aval. Pour remplir un réservoir, il y a deux possibilités, la première est effectuée directement le transfert à l'aide d'un compresseur, et le deuxième est effectué le transfert à partir d'une réserve en surpression.
- Echange de réservoir : On remplace le réservoir vide par un réservoir rempli préalablement. Cette solution, peu utilisée, nécessite quelques moyens de manutention mais étant relativement rapide, elle est assez bien adaptée aux véhicules légers.

##### B. Distribution d'hydrogène liquide

Sous la forme liquide, l'hydrogène offre le meilleur rapport quantité stockée/volume, donc devrait être bien adapté au stockage à bord des voitures particulières. Malheureusement, cette solution exige un équipement cryogénique performant et de plus, la faible ébullition du liquide due aux inévitables pertes thermiques, si réduites soient-elles, exige un réservoir embarqué ouvert permettant un dégagement permanent d'hydrogène. Cela

évite l'accroissement de la pression dans le réservoir. Pour cette distribution il existe deux façons :

- Transfert de l'hydrogène liquide : le maniement de l'hydrogène liquide est délicat car sa température est très basse- ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) et sa vapeur (de l'hydrogène gazeux) est inflammable. Il est néanmoins parfaitement maîtrisé par le secteur de l'aérospatial pour le remplissage des réservoirs de fusée, un savoir-faire qui, si besoin était, pourrait être adapté aux critères de sécurité et aux spécifications économiques de l'industrie automobile. On peut concevoir une station de distribution d'hydrogène liquide comme étant, dans son principe, constituée d'un gros réservoir d'hydrogène liquide d'où l'on soutire les quantités demandées par une légère pressurisation. Pour réduire la durée des transferts et limiter la consommation parasite d'hydrogène liquide, il faut que le réservoir à remplir ne soit pas réchauffé, c'est à dire qu'il ne soit pas complètement vide d'hydrogène liquide.
- Echange de réservoirs : une solution qui, jusque-là, n'a pas été expérimentée. Le remplacement du réservoir vide par un plein exigerait, vu le poids, un équipement de manutention, mais l'opération, outre sa relative rapidité, pourrait présenter l'avantage de reporter le transfert de l'hydrogène liquide hors la présence des clients de la station-service. [6]

### C. Distribution pour les réservoirs a hydrures métallique

Le stockage de l'hydrogène dans les hydrures métalliques est en rapport quantité stockée/volume du réservoir trois fois supérieur à celui du gaz comprimé et offre en cela de l'intérêt pour la voiture particulière. En revanche, en raison du poids élevé des hydrures métalliques, le pourcentage poids  $\text{H}_2$  stocké/ poids du réservoir, environ 7%, n'est pas très favorable. Concernant la distribution proprement dite, il n'est guère possible d'envisager un transfert direct car l'hydratation, qui correspond au remplissage, est très exothermique, et donc exige un refroidissement énergétique du réservoir ; de plus, ce processus physicochimique est assez lent. Un remplacement du réservoir vide par un plein pourrait être une meilleure solution à la condition, là encore, de disposer d'un équipement de manutention adapté au poids, 100 kg ou plus, d'un tel réservoir à hydrures. [6]

### I.3 Les risques liés à la Chain logistique d'hydrogène

L'hydrogène est un gaz léger, à forte diffusivité, extrêmement inflammable et présentant un domaine d'explosibilité étendu, ce qui en fait un produit réputé dangereux. Dans les conditions normales de température et de pression (15°C et pression atmosphérique), L'hydrogène est un gaz incolore, inodore, non toxique et non corrosif susceptible de générer en particulier, en cas de fuite présente des risques spécifiques de différents niveaux de criticité, on peut considérer des risques de niveaux de criticité élevés (incendie, explosion) et des risques de niveaux de criticité a priori faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique. [7]

#### I.3.1 Des risques de niveaux de criticité élevés

##### A. Risque incendie

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable dans les conditions normales de températures et de pression (température et pression sont données à 273,15 K et 1atm).

##### B. Risque explosif

La plage d'explosivité de l'hydrogène est très large, si l'on considère que les limites d'inflammabilité sont similaires aux limites d'explosivité. La vitesse de propagation de la flamme permet de déterminer la nature du régime énergétique de l'explosion :

- Soit la déflagration : le front de flamme se déplace à une vitesse subsonique, les gaz frais sont alors comprimés par l'expansion du volume, on observe une augmentation continue de la pression dans le nuage gazeux ;
- Soit la détonation : la vitesse de propagation de la flamme est supersonique, on observe la formation d'une onde de choc (vitesse de propagation de la détonation dans l'air à TPN est de l'ordre 1480 à 2150 m/s). La flamme d'hydrogène se propage beaucoup plus rapidement. [6]

#### I.3.2 Des risques de niveaux de criticité a priori faibles

##### A. Risque d'asphyxie (anoxie)

Comme pour tous les gaz, l'augmentation de la concentration en hydrogène entraîne la diminution du taux d'oxygène ce qui peut provoquer une asphyxie (anoxie). Le risque d'asphyxie interviendra essentiellement dans les milieux confinés et mal ventilés. L'hydrogène est un gaz très léger (densité = 0,07, beaucoup plus léger que l'air), il aura donc tendance à monter ; et à se diluer très vite dans l'air en milieu ouvert. Il convient toutefois de noter que si les conditions sont propices à l'apparition du risque d'asphyxie (anoxie).

##### B. Risque acoustique

Une fuite d'hydrogène survenant sur une canalisation ou sur une enceinte de stockage peut générer un bruit très important en fonction de la pression et de la vitesse d'échappement. Des essais ont montrés qu'un cadre ouvert d'azote à 20 MPa, équipé d'un orifice de sortie de lyre de 4 mm fait un bruit de 130 dB (équivalent à un avion au décollage à 100 m environ). L'hydrogène étant une molécule plus petite, le bruit sera toutefois moins important. Il convient de s'éloigner pour s'affranchir des conséquences. [6]

### C. Risque thermique

L'hydrogène liquide étant à la température de  $-253\text{ °C}$ , il présente des risques spécifiques :

- Le risque cryogénique : les liquides cryogéniques sont susceptibles de provoquer des effets sur la peau similaire aux brûlures thermiques.
- Le risque de vaporisation : à pression atmosphérique, un litre d'hydrogène peut se vaporiser quasi instantanément en 780 litres de gaz.

#### I.3.3 Les risques liés à la production

D'après les expériences réalisées par. [8] ; Concernant le comportement des mélanges hydrogène/oxygène ou air sous pression ou haute température. Dont le but de développer la production de l'hydrogène on peut distinguer deux types de risques lié à la production :

##### A. Risque d'inflammation ou d'explosion

Il existe un risque de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) dans le procédé ou d'inflammation d'une fuite de gaz. Dans le cas de l'électrolyse, le risque d'explosion est plus important dans la mesure où l'on produit simultanément de l'hydrogène et de l'oxygène. Bien que les cellules soient séparées par des membranes, une étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et il existe donc un risque non négligeable de formation d'un mélange explosif hydrogène/oxygène. Ce risque est déjà connu pour les électrolyseurs classiques. Il est cependant moins bien maîtrisé dans le cas de l'électrolyse haute température ou haute pression, même dans la première étude de sécurité réalisé par sur les électrolyseurs haute pression et notamment sur l'évolution avec la pression et la température, la perméation de l'hydrogène à travers les diaphragmes (un autre risque non négligeable).

##### B. Risque mécanique à température et pression élevées

De même, dans le cas de l'électrolyse, les pressions peuvent aller jusqu'à 30 bars pour une électrolyse classique et jusqu'à 700 bars pour les technologies haute pression. Si dans le cas de l'électrolyse classique, la température ne dépasse pas  $160\text{°C}$ , du fait de l'utilisation d'un électrolyte aqueux, dans le cas de l'électrolyse haute température elle peut atteindre  $800\text{°C}$ . Les risques liés à ces paramètres sont donc principalement les risques de défaillance mécanique des réacteurs et les risques d'éclatement ou de fuite associés

#### I.3.4 Les risques liés au transport

Le risque de transport par route est un risque très difficile à appréhender en termes d'identification, de localisation et de quantification (tonnage des matières transportées). C'est un risque diffus car il est disséminé sur l'ensemble du territoire. En effet, les itinéraires routiers ne sont pas fixes, même si certains axes sont privilégiés, et varient à volonté en fonction de la circulation, des cahiers des livraisons. De plus, le risque routier est un risque collectif car l'ensemble de la population du territoire y est exposé. La prévention résulte de l'application de la réglementation et de son contrôle. La sécurité repose principalement sur la fiabilité des matériels (véhicules, citernes, etc.) et sur la formation du personnel qui le met en œuvre.

### A. Par pipelines

Il consiste à transporter par canalisations, le plus souvent enterrées. De façon générale, les accidents ou incidents survenant sur les canalisations peuvent avoir deux origines :

- Soit une défaillance de la canalisation et des éléments annexes (vannes, etc.).
- Soit une rupture ou une usure due à un événement externe : collision, glissement de terrain, séisme, érosion par une crue de rivière, etc.

### B. Par camion et train

Dans la majorité du temps, l'hydrogène gazeux reste transporté par camion. Pour les petites quantités, sous deux formes :

- dans des structures métalliques appelées « cadres » contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles avec une seule sortie. Les cadres sont déchargés et déposés à la station-service. Ces cadres de bouteilles sont proposés, selon les fournisseurs, dans une gamme allant d'environ 8 kg à plusieurs dizaines de kilos d'hydrogène ;
- dans de grands cylindres, appelés aussi « tubes », sur une remorque contenant plusieurs centaines de kilos d'hydrogène (de 180 à 500 kg). Celle-ci est soit laissée sur site soit transférée ou dépotée, par le livreur, dans un réservoir fixe installé chez le client. Le réservoir peut être la propriété du fournisseur de gaz ou avoir été acheté par le client.

Les cadres ou cylindres ainsi livrés se connectent directement à la station-service d'hydrogène. La pression de remplissage standard des cadres est de 20 MPa (200 bar). Il existe aussi des cadres à 35 MPa (350 bar) et des développements sont en cours pour fournir une logistique à 50 MPa (500 bar) voire 70 MPa (700 bar). [7]

## I.3.5 Les risques liés au stockage

### A. Stockage sous hautes pressions

Le stockage d'hydrogène doit être poursuivi, notamment pour améliorer la maîtrise des risques associés aux différents événements redoutés :

Il se caractérise par une faible densité volumique qui nécessite de le stocker dans des bouteilles ou de grands réservoirs à hautes pressions, qui ont déjà été examinés et soumis à des agressions (feu, tir à balle, chute...), afin d'évaluer d'une part le niveau de fiabilité des dispositifs de sécurité (fusible thermique et limiteur de débit) et d'autre part le maintien de l'intégrité de ces réservoirs.

### B. Stockage solide

La mise en contact accidentelle du composé adsorbant (sous forme de poudre) avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles est plus particulièrement redoutée compte tenu des risques d'incendie violents qui peuvent en résulter. Ceci conduit à des tests sur différents matériaux adsorbants qui sont soumis à des conditions similaires à celles rencontrées en situation accidentelle. Les premiers résultats mettent en évidence, pour les hydrures testés, l'absence de réaction à l'air libre et à l'eau. [6]

### **I.3.6 Risques associés à la distribution dans les stations-service**

La maîtrise des risques de fuite et d'inflammation de l'hydrogène ainsi que de surpression dans la zone de distribution fait l'objet d'une attention particulière qui conduit à un développement de mesures de maîtrise des risques innovantes et spécialement adaptées à la distribution d'hydrogène. Par exemple la borne de distribution est munie d'un dispositif anti arrachement, un arrêt d'urgence qui déclenche en cas de collision... Le protocole de distribution est défini de manière très précise avec un suivi des paramètres clés (la température, la pression...) et repose sur une interface de communication entre le véhicule et la borne de distribution. La charge du réservoir, la température et la pression sont communiquées et vérifiées en permanence par un système de régulation qui optimise les débits et interrompt le chargement automatiquement. [6]



## I.4 La Gestion Des Risques

La gestion des risques est une opération commune à tout type d'activité. Les objectifs poursuivis peuvent concerner par exemple : le gain de rentabilité, de productivité, la gestion des coûts et des délais, et la qualité d'un produit...

### I.4.1 Principes pour la gestion des risques

La gestion du risque peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées en vue de réduire le risque à un niveau juré tolérable ou acceptable. De manière classique, la gestion du risque est un processus itératif qui inclut les étapes mentionnées dans la Figure I-2 : processus de la gestion du risque Ci-dessous.

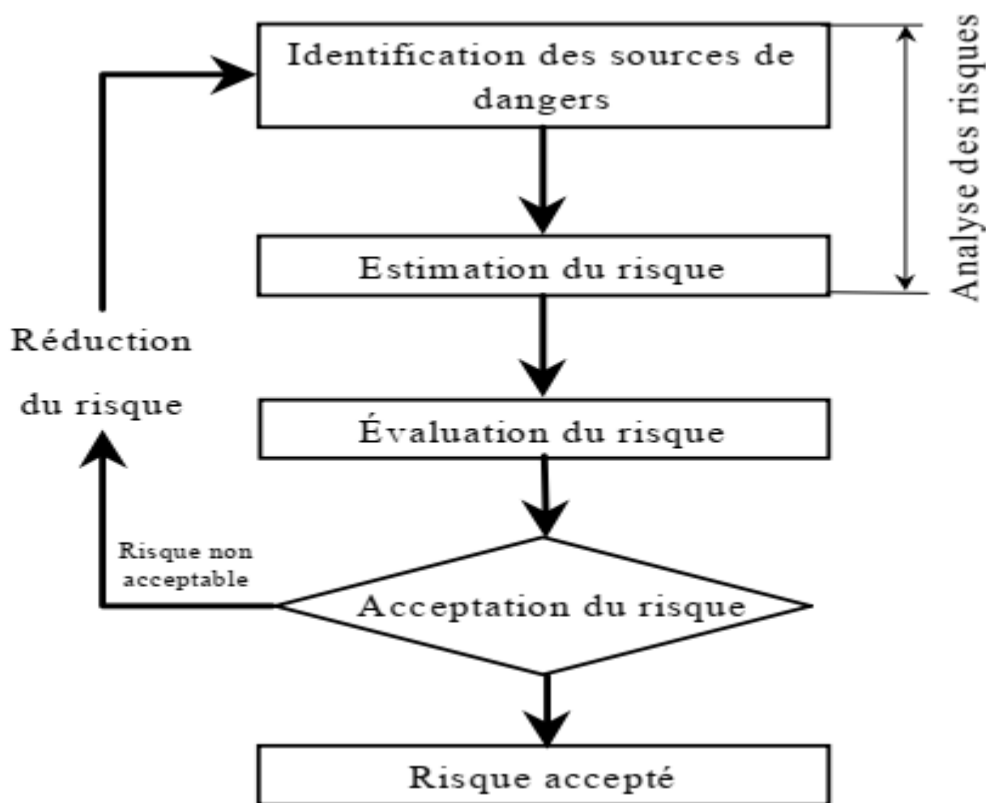


Figure I-2 : processus de la gestion du risque [9]

Signalons que lorsque la gestion des risques s'applique à un système complexe mobilisant plusieurs acteurs, ce processus doit s'accompagner d'une étape de communication. Cette dernière peut concerner les dangers identifiés ou les mesures prises pour la maîtrise des risques associés.

#### I.4.1.A Analyse des risques

L'analyse du risque est définie comme l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque. [9]. Et selon. [10], c'est Une démarche ayant pour but d'identifier les dangers potentiels, d'en apprécier les risques (vraisemblance, gravité) et de les gérer en cherchant des moyens pour les maîtriser.

L'analyse des risques vise à identifier les sources de dangers, permet de mettre en lumière les barrières de sécurité, permet d'estimer les risques, et de la comparer ce niveau de risque

à un niveau juré acceptable selon un seuil d'acceptabilité de risque prédéfinie. Sachant que cette estimation de niveau de risque fait selon deux paramètres qui sont : le niveau de probabilité d'occurrence dès l'évènement indésirable et la gravité des conséquences (humaine, matériels et environnemental).

Les principales sources de dangers et les scénarios d'accident doivent être recensés et identifiés. La complexité de certains systèmes étudiés requiert l'utilisation des outils d'analyse aidant à l'identification des dangers. [11]

#### **I.4.1.B L'évaluation des risques**

L'évaluation du risque désigne une procédure fondée sur l'analyse du risque pour décider si le risque tolérable (ou acceptable) est atteint. Elle revient à comparer le niveau de risque estimé à un niveau jugé acceptable ou tolérable.

En pratique, cette phase peut être accompagnée d'une quantification détaillée et précise (par opposition à l'estimation des risques qui reste très simplifiée) des grandeurs qui caractérisent le risques.

#### **I.4.1.C Acceptation du risque**

La définition de critères d'acceptabilité du risque est une étape-clé dans le processus de gestion du risque dans la mesure où elle va motiver la nécessité de considérer de nouvelles mesures de réduction du risque et rétroactivement, influencer les façons de mener l'analyse et l'évaluation des risques. Quels que soient les critères d'acceptation retenus, il est indispensable qu'ils soient connus et explicites préalablement à toute phase d'analyse des risques. Si le risque est jugé acceptable le processus de gestion sera terminé et le risque jugé sera surveillé. Dans le cas contraire, le processus continue en passant à l'étape de réduction. [12]

#### **I.4.1.D Réduction du risque**

Dans le cadre du traitement des risques, on peut agir sur la probabilité d'occurrence ou sur la gravité des conséquences potentielles d'un événement, parfois sur les deux composantes du risque. De façon générale, il existe cinq grandes catégories d'options de traitement des risques qui doivent toutes être considérées afin de faire une gestion efficiente des risques: [11]

1. *La prévention* qui vise la réduction de la probabilité que des événements indésirables surviennent.
2. *L'atténuation* qui vise à réduire les conséquences si de tels événements se produisaient en limitant l'exposition (des gens, de l'environnement, des structures, etc.) par la mise en place de mesures techniques ou de distanciation.
3. *La préparation* qui vise aussi à réduire les conséquences si de tels événements se produisaient, mais cette fois, en augmentant la capacité d'intervention des équipes d'urgence et la résilience de l'organisation.
4. *L'intervention* lorsque de tels événements se produisent réellement, c'est-à-dire la mise en œuvre et l'ajustement des mesures d'urgence préparées au préalable selon les besoins de la situation en cours.



5. La continuité des fonctions critiques de l'organisation et le rétablissement chronologique des autres fonctions essentielles par la mise en œuvre et l'ajustement des mesures préparées au préalable.

L'ensemble de ces options constitue ce qu'on appelle des barrières de sécurité. Afin d'expliquer les options possibles, le concept de barrières de sécurité doit être vu plus en détail dans la suite de ce chapitre.

La réduction du risque (ou maîtrise du risque) désigne l'ensemble des actions ou dispositions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier.

### **I.5 Analyse dysfonctionnelle : la méthode (HAZard and Operability)**

La méthode HAZOP est une technique structurée et systématique d'examen des systèmes et de gestion des risques. La méthode HAZOP a été choisie parmi les méthodes d'analyse dysfonctionnelle, car c'est la méthode appropriée pour étudier les systèmes thermo-hydrauliques. En effet, nous considérons l'hydrogène comme le fluide à étudier et notons leur écart par rapport au système à étudier. [13]

Cette méthode identifie les écarts par rapport à l'intention de conception en appliquant des mots-guides (non, plus, moins, ainsi qu'une partie de, inverser, autre que ...) à des aspects de l'intention de conception (tels que débit, température, pression, niveau, etc.). Et concentration...). Cette méthode aide à stimuler l'imagination des membres de l'équipe lorsqu'ils explorent des déviations potentielles. [14]

En tant qu'outil d'évaluation des risques, la méthode HAZOP est souvent décrite comme suit: une technique de brainstorming, un outil d'évaluation des risques semi-quantitatif, un outil d'évaluation du risque inductif, ce qui signifie qu'il s'agit d'une approche «ascendante» d'identification des risques, où leur succès repose la capacité de l'expert de l'équipe à prévoir les écarts en fonction de ses expériences passées et de son expertise générale sur le terrain. La technique de la méthode HAZOP est plus reconnue dans la littérature et fait l'objet de plusieurs études.

Ensuite, nous décrivons brièvement cette méthode. Pour plus d'informations, consulter les références suivantes : [10]. Et le processus HAZOP présenté à Figure I-4. vise à produire un ensemble complet d'échecs pour élaborer un tableau des dangers montrant que les dangers sont contrôlés par des barrières de sécurité appropriées et assorties de recommandations.



Figure I-3 : les étapes de la méthode HAZOP [17].

Les principales caractéristiques de l'examen HAZOP sont les suivantes : Premièrement, l'examen est un processus créatif. La revue utilise une série de mots-guides pour identifier les déviations potentielles par rapport à l'intention de conception, et considère ces déviations comme des "dispositifs déclencheurs" permettant d'examiner la manière dont une déviation peut se produire et quelles en sont les conséquences. Deuxièmement, l'examen est effectué par une équipe, qui doit fournir une couverture complète du système à l'étude, en utilisant une logique, une pensée analytique. Enfin, l'examen s'appuie sur des experts de différentes disciplines, dotés des compétences et de l'expérience nécessaires pour faire preuve d'intuition et de discernement.

Parmi les avantages de l'analyse HAZOP, elle s'applique quelle que soit la taille du système, car l'application des mots-clés est indépendante de la taille du système [15]. En outre, l'analyse HAZOP appropriée pendant toutes les étapes du cycle de vie du système, le HAZOP peut être utilisé et exécuté dans la conception, pour améliorer la conception du système, afin d'extraire les problèmes pouvant être résolus en cas de changement. Dans le dernier, vous pouvez vous référer à cette analyse HAZOP dans d'autres activités de projet ou intégrer ce système dans une autre ligne de production.

D'autre part, parmi les limitations de la méthode HAZOP, on peut citer les suivantes : [16] : la qualification de l'équipe influe sur la qualité de l'étude. Et le processus HAZOP ne prend pas explicitement en compte les erreurs qui provoquent une défaillance du système.

## I.6 Conclusion

*Par la présente chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie renouvelable (l'hydrogène) et nous avons cité les principes de gestion des risques puis la méthode d'analyse de sécurité du système que nous avons choisie (la méthode HAZOP). Dans le chapitre suivant, nous appliquons la méthode choisie pour étudier le système de l'entreprise fait l'objet de notre stage pratique*

## II Chapitre 2 :

Présentation d'historique de l'entreprise depuis sa création jusqu'à la coopération avec les allemands, dans le même chapitre nous avons présenté en détail le processus de production d'hydrogène adopté par le groupe Linde gas Skikda.

## II.1 Introduction

*D'après la description des systèmes de production d'hydrogène et les risques liés à cette activité, nous avons réalisé un stage pratique au niveau de l'entreprise leader pour cette activité afin d'analyser les risques liés à cette activité par une méthode parmi les méthodes d'analyse de sécurité des systèmes et puis nous avons retenu un scénario afin de modéliser l'explosion qui peut se produire moyennant un logiciel PHAST.*

## II.2 Présentation des entreprises

Nous avons décrit les lieux de stage que nous avons visités durant les deux mois de semestre 6 afin de réaliser notre mémoire de fin d'étude :

### II.2.1 GI/LINDE (GROUPE INDUSTRIELLE LINDE)

The Linde Group est une société internationale de gaz industriel - et société d'ingénierie fondée en 1879 par Carl Von Linde et ses associés. Le siège social est à Munich. Le nom officiel est Linde AG. Linde actions sont négociées sur toutes les bourses allemandes ainsi que dans Zurich. Linde fait partie du DAX-index.

Linde Gas Algérie compte 608 Salariés, 9 Sites de production, 3 au Centre (Alger, Bouira et Ouargla), 3 à l'Ouest (Arzew, Sidi Bel-Abbes, Oran) et 3 à l'Est (Annaba, Skikda, Constantine), ainsi que 52 Concessionnaires répartis à travers le territoire National.

L'activité principale de Linde Gas Algérie est la production et la commercialisation des Gaz Industriels et Médicaux, ainsi que la satisfaction des besoins générés par l'application de ses gaz dans différents secteurs économiques.

Du Nord au Sud, de l'Est à l'Ouest du pays, Linde Gas Algérie est le principal fournisseur des gaz Médicaux et industriel.

Grâce à sa flotte de réservoirs cryogéniques de différentes capacités et à sa pression de bouteilles élevée, Linde Gaz Algérie assure la fourniture de gaz médicaux et industriels aux principales structures hospitalières et aux entreprises situées sur le territoire algérien.

#### II.2.1.A L'historique de l'entreprise

Nous citons l'importante date de restructuration de l'ENGI :

- **1959** : l'entreprise (L'air liquide) est créée pendant la durée de colonialisme française où l'unité d'Ouargla a démarré.
- **1972** : l'état algérien a récupéré la société sous l'activité de la société nationale de sidérurgie SNS.
- **1983** : l'ENGI (l'entreprise nationale de production et distribution des gaz industriels) est créé après la restructuration de la société SNS.
- **1989** : Elle est ensuite transformée en société par action et entrée dans l'autonomie avec un capital de 30 million de Dinars. Elle a 10 unités dans le territoire national : Ouargla, Alger, Annaba, Constantine, Reghaia, Oran, Bouira, Sidi Belabbes, Arzew et Skikda.
- **2007** : la société est nommée : Linde Gaz Algérie après la coopération avec le partenaire Allemand en date du 30/06/2007.

## II.2.2 GI/LINDE Hassi Messoud

Branche de groupe Linde dans hassi Messaoud la wilaya d'Ouargla.

### A Activité principale

Production et commercialisation des gaz industriels et médicaux.

*Tableau II-1 : données technique de l'installation.*

Les produits	Capacité	Pression	Température	Pureté	Impureté
Air	12200 Nm <sup>3</sup> /h	5.48 bar (abs)	69 °C	/	/
Produit -O <sub>2</sub>	2250 Nm <sup>3</sup> /h	2.5 bar (abs)*	-183 °C	99.8 % O <sub>2</sub>	/
Produit-N <sub>2</sub>	1000 Nm <sup>3</sup> /h	3.5 bar (abs)*	-193 °C	/	2 ppm O <sub>2</sub>
N <sub>2</sub> sous pression	100 Nm <sup>3</sup> /h	5.29 bar (abs)	30 °C	/	2 vppm O <sub>2</sub>
Produit Ar	75 Nm <sup>3</sup> /h	3 bar (abs)*	-183 °C	99.999 % Ar	<2 vppm O <sub>2</sub> <5 vppm N <sub>2</sub>

### B Histoire et création

L'unité de Hassi Messoud est entrée en production en 2003. Elle a été réalisée par la firme allemande Linde AG en 2001.

### C Situation

L'entreprise GI/LINDE est implantée dans la zone industrielle N<sup>o</sup> 02 des sociétés mixtes située à 20 km de centre-ville de Hassi Messaoud, et a une centaine de mètres de abords de la route menant vers EL BORMA. L'entreprise s'étend sur une superficie de 59 915 m<sup>2</sup>. Et comprend un complexe de traitement de gaz de l'air [distillation de l'air liquide] et une unité de conditionnement des gaz d'oxygène, argon et azote.

### D Caractéristiques du site

Le site est localiser dans une zone d'expansion industrielle, à l'écart de tout agglomération ou milieu humain, avec pour seul voisinage actuel, la société de service MI s'écaillée dans les boues de forage.

## II.2.2.A SOMMAIRE DU PROCESSUS

### - Principes théorique : Composition de l'air

La composition de l'air excepte l'humidité fluctue à l'intérieur d'intervalles étroits. Les composants de l'air sec les plus importants sont mentionnés.

Tableau II-2 : composition de l'air.

Élément	Symbole chimique	Volume %	Masse %
Azote	N <sub>2</sub>	78.1	75.5
Oxygène	O <sub>2</sub>	20.95	23.1
Argon	Ar	0.93	1.29
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	Ca 0.03	0.05
Gaz rares	...	0.002	...

### A. Unité de séparation

L'unité de séparation et conditionnement des gaz industriels de GI/LINDE, représente la première usine dans la région de Hassi Messoud. Le principe de fonctionnement de cette usine, consiste à la production des gaz O<sub>2</sub> N<sub>2</sub> Ar<sub>2</sub> à partir de l'air atmosphérique ; et le conditionnement des bouteilles d'oxygène, d'azote et d'argon. Grâce à l'usage des installations et des machines appropriées à cet usage.

Il faut noter que l'unité de conditionnement représente la première extension de l'activité de la société.

- **Séparation cryogénique de l'air**

L'air peut être séparé dans ses composants au moyen de distillation dans les unités spéciales.

Les usines dites celle de fractionnement ou de séparation de l'air utilisent un processus thermique connu sous le nom de Rectification cryogénique pour séparation les différents composants les uns des autres afin de produire l'azote et l'oxygène de haute pureté sous forme liquide et gazeuse. Les différentes technologies de séparation de l'air qui

- La séparation cryogénique

La séparation par membrane ont été développées sont (La séparation par adsorption).

Ces différentes technologies s'appliquent selon les différentes conditions sur la quantité et la pureté des produits.

Les méthodes telles que la séparation par membrane sont également disponibles mais elles sont actuellement moins employées que les autres qui sont dominantes.

Le procédé cryogénique de séparation de l'air c'est le procédé le plus populaire de séparation d'air et il est le plus utilisé fréquemment dans toutes les usines et a une large échelle C'est la technologie la plus préférée pour l'azote et l'oxygène et aussi l'argon comme gaz et/ou produits liquides et elle est censée pour être la technologie la plus rentable pour les usines de hautes cadences de fabrication.

Les usines de séparation de l'air sont construites dans différentes formes selon quels produits désires et leur degré de pureté ; qui seront fabriqués et la capacité productive. Alors des différents équipements de processus et les machines de différents fabricants sont utilisés. Cependant, les principes de base de la construction et des méthodes de travail pour toutes ces différentes usines sont presque identiques.

Il y a différentes variations (les exigences du consommateur, la nature de produit final...) qui définissent et exigent le choix des cycles cryogéniques de séparation d'air, à savoir :

- Combien de produits sont exigés (si simplement l'oxygène, azote ou argon, l'oxygène et azote et argon).
- Degré de pureté exigée des produits.
- Pressions de livraison des produits gazeux.
- Si le plus important c'est le procédé qui permet d'utiliser une énergie minimale et bien sûr avoir un rendement maximum.

Quand une nouvelle usine doit être construite et la capacité productive et la pureté de chaque produit final doit être déterminées, le processus le plus approprié sera celui si de telle manière que la consommation d'énergie et le prix d'achat seront les plus bas possibles tout en réalisant un rendement maximal.

L'unité de conditionnement des gaz industriels de Hassi Messaoud est attenante à l'usine de traitement et mise en œuvre des gaz de l'air de GI/LINDE dont elle représente la première extension.

### **B. Unité de conditionnement des gaz O<sub>2</sub> N<sub>2</sub> Ar**

Au stade actuel cette unité de conditionnement qui est en cours de mise en service, est approvisionnée en oxygène et argon aussi l'azote à partir des stocks de gaz de l'usine GI/LINDE. Ces gaz sont principalement utilisés comme suit :

- L'oxygène pour le secteur industriel
- L'oxygène pour le secteur de la santé
- L'argon en mélange au gaz carbonique pour les procédés de soudage
- L'azote pour le secteur industriel.

L'unité dispose à cet effet d'un stockage propre d'azote et d'argon dans 2 réservoirs de 11 m<sup>3</sup>. Et d'oxygène de 20.021 m<sup>3</sup> environ qui alimentent :

- La chaîne de conditionnement d'oxygène, avec 2 postes de remplissage de bouteilles pour l'industrie et pour le secteur sanitaire.
- La chaîne de conditionnement d'argon avec ou sans mélange de CO<sub>2</sub> pour l'industrie.
- La chaîne de conditionnement d'azote pour l'industrie.

L'unité dispose également d'un parc de stockage à l'extérieur pour bouteilles destinées à la livraison et celles acheminées pour remplissage.

### **II.2.3 GI/LINDE SKIKDA**

L'unité de Skikda Linde gaz Algérie dispose d'une unité de transformation et de production de gaz au niveau de la plateforme pétrochimique de Skikda. Cette unité produit de l'oxygène, de l'azote, de l'argon, de l'hydrogène et de l'anhydride carbonique. Elle assure le conditionnement de ces produits et leur commercialisation à travers le territoire national et l'export. Ces produits sont demandés par les industries pétrolières avoisinantes, l'industrie alimentaire, le secteur sanitaire, les centres de recherche et universités, les collectivités locales, les artisans et le ministère de la défense etc...



### A. Implantation de l'unité de Skikda

L'unité Linde gaz Algérie est implantée dans la zone pétrochimique située dans la commune de Skikda qui est le siège de la wilaya. Cette zone est distante de 1 km de la R.N 44 tout près de L'oued SAFSAF. A l'intérieur de la plateforme pétrolière, l'unité est installée à 200mètres de la route A3 qui communique avec le poste 5 elle limitée par :

Au nord : DEV3 et DEV4 Est : DEV5, RAIK

Au sud : terrain vague et maquis Sud-ouest ERTE, DRGH

Elle est délimitée par une clôture et d'une garde, l'accès à l'intérieur du site est réglementé.

### B. Taille et capacité de l'unité

L'unité Linde gaz d'Algérie dispose d'une capacité de production qui peut satisfaire les besoin du pays et l'exportation : en matière de l'air, d'anhydride carbonique et d'hydrogène. Elle est dimensionnée pour assurer une couverture nationale et satisfaire particulièrement les besoin des entités suivantes : ces produits sont demandés par les industries pétrolières avoisinantes, l'industrie alimentaire, le secteur sanitaire, les centres de recherche et universités, les collectivités locales les artisans et le ministère de la défense etc. L'unité est dotée de quatre installations pour la fabrication et le stockage des gaz, le conditionnement des bouteilles de gaz, des magasins, des bureaux et les annexes nécessaires à la production. L'implantation de cette unité s'étale sur une superficie de 37609.81 m<sup>2</sup>. L'unité Linde gaz Algérie produit, stocke et dispose d'atelier de conditionnement (l'oxygène, l'azote, l'argon, l'hydrogène et l'anhydride carbonique).

### C. Aménagement de l'unité

L'unité est installée sur une surface de 37948 m<sup>2</sup>, son aménagement a été réalisé compte tenu de l'enchaînement du processus de fabrication ainsi que des moyens de stockage afférents à chaque installation. Elle est dotée d'une infrastructure permettant une circulation aisée des camions qui peuvent effectuer les manœuvres de chargement du liquide ou des cadres de bouteilles de gaz en toute sécurité ainsi que l'accès aux engins lourds pour les besoins de la maintenance. A l'intérieur de cette unité un espace clôturé par une murette est affecté à messer qui produit de l'azote gazeux, cette installation juxtapose l'installation gaz de l'air et bénéficie des utilités (eau, électricité et infrastructures) de l'unité Linde gaz Algérie Les zones sont affectées aux installations suivantes :

- Le poste d'entrée
- Le poste électrique
- Le poste de détente GN arrivée principale
- La réserve d'eau brute et bâches à eau du réseau d'incendie, poste de détente
- L'administration, l'installation hydrogène, le magasin de pièce de rechange, atelier de maintenance, la station de déminéralisation et le gazomètre d'hydrogène
- Le magasin des produits chimiques, le hangar de dépôt
- L'installation de gaz de l'air et messer et réservoirs de stockage
- L'installation d'anhydride carbonique et réservoirs de stockage



- Le conditionnement (oxygène, azote et argon)
- Le conditionnement (hydrogène)
- Le dépôt de bouteilles de gaz vide
- Le magasin des huiles, parking des camions citernes cryogéniques.
- L'atelier de ré-épreuve des bouteilles.

### II.2.3.A Atelier de l'anhydride carbonique

Le GN est brûlé dans une chaudière à tube, les fumées chaudes provenant de la chaudière sortent à une température de 250 °C et sont refroidies à 38 °C pour augmenter l'efficacité de l'absorption puis lavées à l'eau dans la tour de lavage des fumées. Le CO<sub>2</sub> contenu dans la fumée est absorbé par une solution MEA qui circule à contre-courant dans la tour d'absorption. Le CO<sub>2</sub> sera libéré de la MEA dans la tour de condenseur. Le CO<sub>2</sub> humide traverse à contre-courant une solution de KMNO<sub>4</sub> pour éliminer les impuretés et passe par une tour de lavage à l'eau en cas de présence éventuelle de KMNO<sub>4</sub>. Le CO<sub>2</sub>, refroidi par le réfrigérant primaire alimenté par le NH<sub>3</sub> pour diminuer la quantité d'humidité, passe dans un compresseur non lubrifié pour être comprimé jusqu'à une pression qui permettra sa liquéfaction, le CO<sub>2</sub> passe ensuite par un purificateur contenant du charbon actif pour éliminer toute sa trace de soufre, il est ensuite séché pour un point de rosée réduit et filtré. Le CO<sub>2</sub> liquéfié alimentera par gravité les ballons de stockage.

### II.2.3.B Atelier de conditionnement

Les bouteilles sont remplies à une pression de 150 bar par une pompe cryogénique conçue à cet effet à partir du réservoir de 5000 litres. Le produit est transformé en gaz par un échangeur atmosphérique (évaporateur), il est véhiculé ensuite par conduite d'amenée jusqu'à la rampe de remplissage des bouteilles ou cadres. La présentation générale de projet est représentée dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Tableau II 3 : présentation générale du projet.

Etablissement appartient	LINDE GAZ Algérie		
Produit fabrique	Azote, oxygène, Argon, l'anhydride carbonique et l'Hydrogène gazeux		
Procède	Par fractionnement de l'air pour l'Oxygène, l'Azote et l'Argon,		
	Par combustion du GN pour l'anhydride carbonique		
	Par électrolyse pour l'hydrogène		
Capacité design	produit	Marche azote	Marche mixte
Installation gaz de l'air	Oxygène	-	1564 L/heure
	Azote	4000L/heure	1780L/ heure
	Argon	64L/ heure	
Installation hydrogène	2 installations	: 25 Nm <sup>3</sup> / heure	
	Soit un total de	: 50 Nm <sup>3</sup> /heure	
Installation CO <sub>2</sub>	2000 kg /heure		
Stockage du produit	Oxygène liquide	2 × 250000 l	
	Azote liquide	2 × 250000 l	
	Argon liquide	1 × 20000 l	
	Anhydride carbonique	4 × 100 tonnes	
Conditionnement	Oxygène gazeux médical	973 m <sup>3</sup>	
	Oxygène industriel	3871 m <sup>3</sup>	
	Anhydride carbonique	2675 m <sup>3</sup>	
	Azote	3899 m <sup>3</sup>	
	Argon	3941 m <sup>3</sup>	
	Hydrogène	16170 m <sup>3</sup>	
	Air synthétique	80 m <sup>3</sup>	
Année de démarrage	Gaz air	1993	
	Anhydride carbonique	1999	
	Hydrogène	2004	
	conditionnement	2004	
Phase principales du design	Installation oxygène, azote et argon	Installation CO <sub>2</sub>	Hydrogène
	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Filtration, compression</li> <li>. Refroidissement de l'air</li> <li>. Epuration de l'air</li> <li>. Fractionnement de l'air</li> <li>. Stockage de l'oxygène et de l'azote liquides</li> <li>. Purification de l'argon et stockage sous forme liquide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Combustion du GN,</li> <li>. Refroidissement des fumées</li> <li>. Absorption du CO<sub>2</sub> contenu dans les fumées par le MEA,</li> <li>. Lavage du CO<sub>2</sub></li> <li>. Compression du CO<sub>2</sub></li> <li>. Epuration de CO<sub>2</sub></li> <li>. Liquéfaction du CO<sub>2</sub></li> <li>. Stockage du liquide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Electrolyse à courant continu sur une solution (électrolytique)</li> <li>. Séparation O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub></li> <li>. Lavage H<sub>2</sub></li> <li>. Compression H<sub>2</sub></li> <li>. Epuration H<sub>2</sub></li> <li>. Stockage de l'hydrogène sous forme gazeux</li> </ul>
Amélioration apportée	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Installation d'un système numérique de contrôle et de sécurité (DCS) en mars 2006</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Installation d'un système numérique de contrôle et de sécurité (DCS) en 2002</li> <li>. Mise en place d'un nouveau compresseur à piston non lubrifié en 2004</li> <li>. Renouvellement de plusieurs équipements après 10 années de services</li> </ul>	
Projet	Récupérer les effluents du CO <sub>2</sub> de GNL		
Nombre de personnes employées	44		

### II.3 Présentation de système étudié

Notre étude est basée sur l'atelier de production d'hydrogène, donc cette explication sur la méthode adopter par le groupe Linde Skikda.

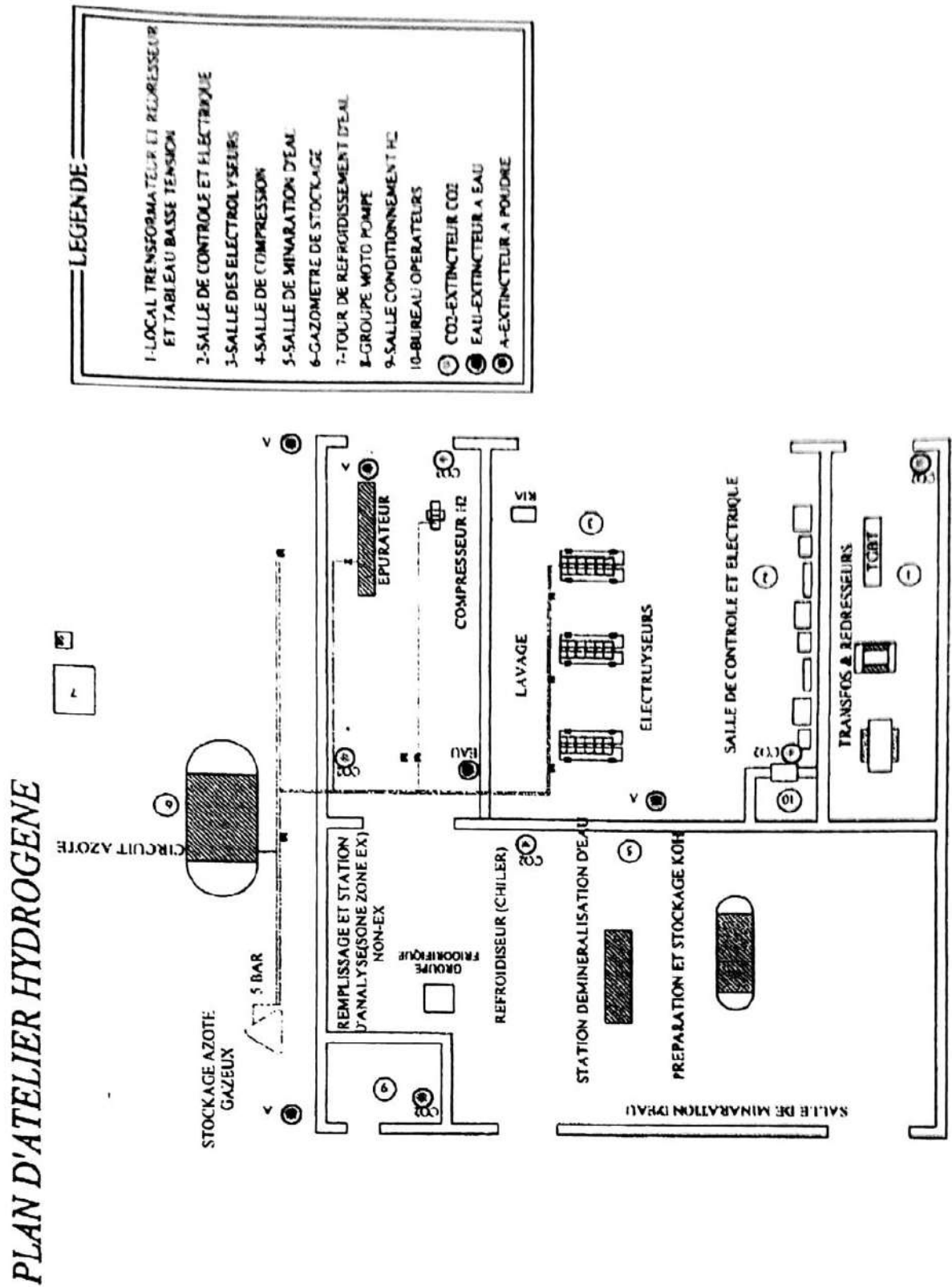


Figure II-1 : plan d atelier hydrogène.

### II.3.1 Présentation d'atelier d'hydrogène.

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée de l'hydrogène. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante. Ces processus peuvent être séparés en quatre groupes de technologies (les technologies électrolytiques, les technologies thermochimiques, les technologies nucléaires, les technologies photolytiques).

L'hydrogène dans l'atelier de Skikda est produit par l'électrolyse d'eau, dans un électrolyseur alcaline appelé HySTAT-A.

#### II.3.1.A Le processus de productions

La production de l'hydrogène dans l'atelier de Linde Skikda, est obtenue par électrolyse alimentée par un courant continu de 3000A. Une solution électrolytiques (KOH et eau déminérée) circulant dans les cellules de l'électrolyseur, la molécule d'eau est détruite par l'effet du courant, à l'extrémité se trouve deux pôles anode et cathode. L'oxygène capté par anode est dégagé vers l'atmosphère tandis que l'hydrogène capté par la cathode est envoyé vers le gazomètre puis subit une compression ensuite il sera sèche et envoyé vers le stockage (bouteilles, cadres, triller, cigare a une pression de 150 bar a 200 bar). La figure suivant représenter le technique utiliser par Linde Skikda.

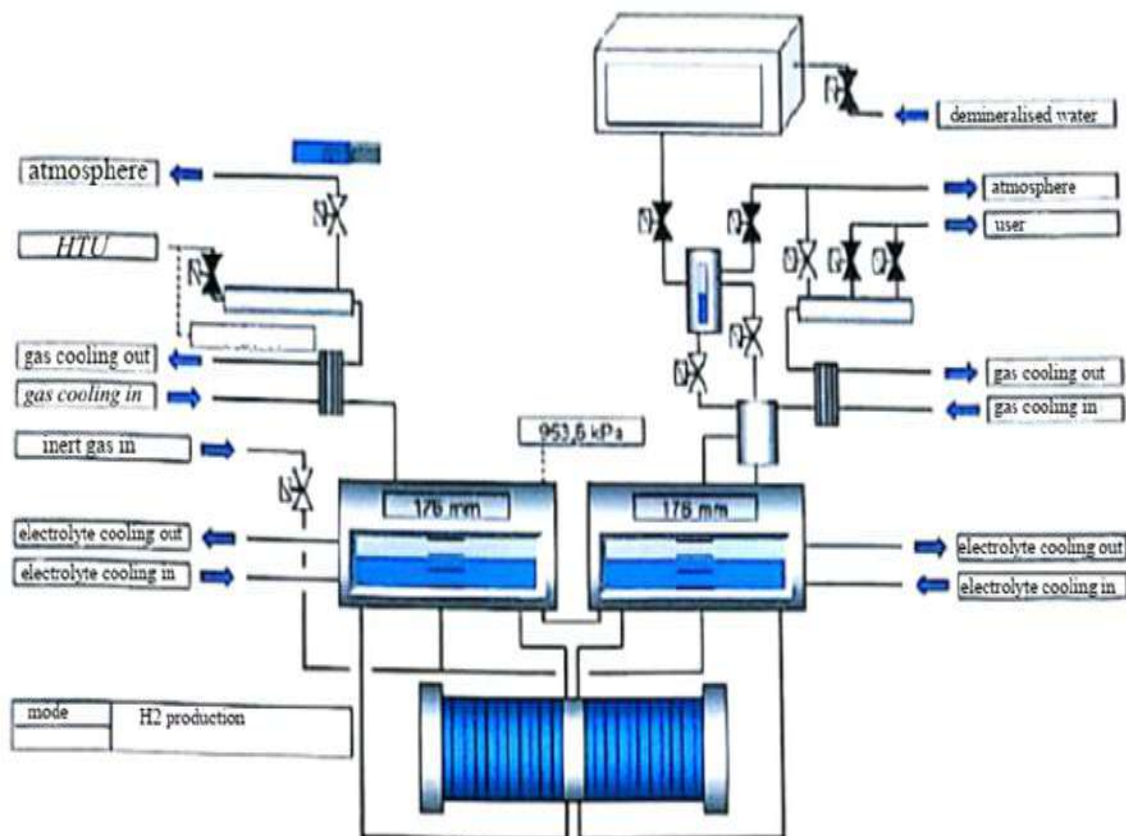


Figure II-2 : écran de contrôle de l'électrolyseur.

Les composants primaires de l'électrolyseur de HySTAT-A sont des cellules d'électrolyse. Dans chaque cellule l'eau entrant (mélangée à la solution d'hydroxyde de potassium de 30%

pour obtenir la conductivité exigée) est décomposé en deux éléments de base ; l'hydrogène et l'oxygène. Le kit des cellules se compose d'une série reliée ensemble, composé de cellules d'électrolyse circulaires, les deux électrodes sont séparées au milieu par une membrane d'échange ionique inorganique. L'oxygène et l'hydrogène produits aux électrodes sont protégés contre la recombinaison avec la membrane inorganique. Quand un courant C.C est appliqué aux électrodes une réaction électrochimique se produit.

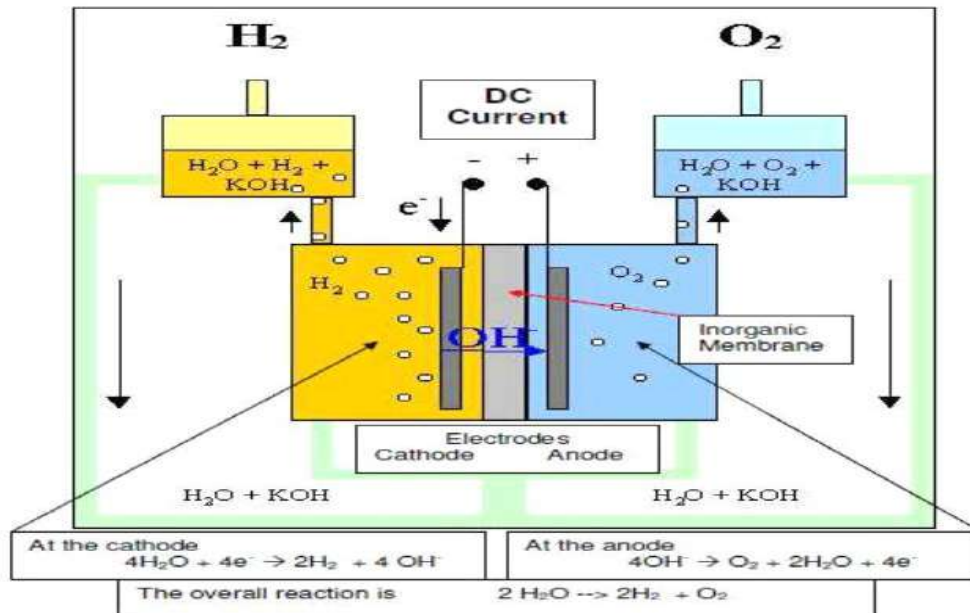


Figure II-3 : cellule d'électrolyse.

Les bulles d'hydrogène et d'oxygène sont produites dans la pile de cellules quand le courant C.C est appliqué. Ces bulles sont portées avec l'électrolyte jusqu' au le haut des cellules, et ensuite sont rassemblées dans les deux canaux séparés dans le kit électrolyseur. Les gaz traversent les deux sorties pour arriver au séparateur où le gaz et le liquide sont séparés. Hydrogénais a réussi de faire une conception sans pompe d'électrolyte. Ça sera possible en faisant une utilisation optimale de trois caractéristiques physiques :

- l'écoulement créé par la monté des bulles de gaz va littéralement résister à la pénétration de l'électrolyte à travers le passage de gaz
- la différence de la masse volumique entre l'électrolyte à l'admission inférieure de la pile de cellules et le mélange du gaz-électrolyte à la sortie supérieure.
- la convection due à la différence de la température dans l'électrolyte entre l'entré et à la sortie.

Ces caractéristiques créent une circulation normale et automatique de l'électrolyte à travers les différentes cellules.



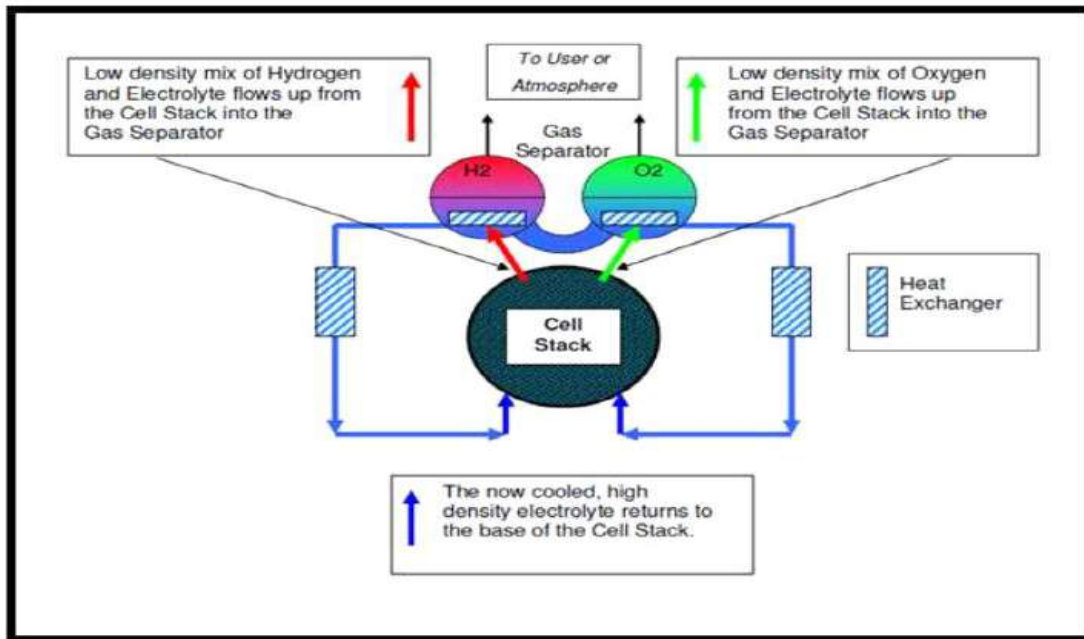


Figure II-4 : organigramme de gaz.

Dans le séparateur de gaz, l'hydrogène et l'oxygène peuvent être envoyés à l'utilisateur ou à l'atmosphère. D'abord l'hydrogène est passé à travers le laveur débité par l'eau déminéralisée propre dans laquelle le gaz est versé et l'hydroxyde de potassium résiduel est réduit. Après les gaz d'hydrogène et l'oxygène coulent à travers des échangeurs de chaleur séparés et en suite par le fusion-filtre pour réduire en plus la vapeur dans les gaz. Le gaz est envoyé à l'atmosphère ou à l'utilisateur à l'aide des valves électromagnétiques commandées par le PCS. L'eau déminéralisée est acheminée au séparateur de gaz d'hydrogène par l'intermédiaire de laveur pour remplacer l'eau consommée par électrolyse. Ce processus est complètement commandé par le PCS et fait par un système d'un régulateur intermédiaire ou remplisseur de volume avec des valves commutées dans un certain ordre. Le remplisseur de volume est cycliquement pressurisé par la pression du système, ainsi la pompe n'est pas nécessaire.

**Remarque :** le schéma simplifié de processus de production d'hydrogène dans l'annexe page 68.

### II.3.1.B Les composants du système HySTAT-A

Le HySTAT-A ; C'est le composant principal d'atelier d'hydrogène ou c'est le cœur de l'unité, il y fabrique dans la Belgique.

#### A. Introduction au système de HySTAT-A

Le HySTAT-A utilise la technologie alcaline IMET (technologie inorganique d'électrolyse de membrane) pour produire l'hydrogène. Le HySTAT-A se compose de deux sous-systèmes de base : la partie de processus qui produit l'hydrogène (les générateurs d'hydrogène) et l'EPS (alimentation d'énergie d'Electrolyseur), qui se compose, non seulement l'alimentation d'énergie, mais également le PCS (système de commande de propriété industrielle). Le PCS est le système de commande basé sur un microprocesseur qui est employé dans tous les générateurs d'hydrogène.

### **B. L'alimentation de l'électrolyseur en énergie (EPS)**

L'EPS (Electrolyser Power Supply) comprend l'alimentation d'énergie pour les piles de cellules d'électrolyse mais également le système de commande et de surveillance pour le sous ensemble de processus. La taille et la disposition dépend de la taille et de la conception de l'unité. Le courant C.C est fourni à la pile de cellules par l'EPS, et ce dernier est installé en dehors du secteur dangereux d'explosion. La distance minimum entre l'EPS et la partie de processus dépend de la conception et du règlement local. L'électrolyseur est complètement commandé et conduit par le PCS, qui est incorporé dans l'EPS. Le HySTAT-A est conçu d'une façon qui peut démarrer et fonctionner sans l'aide d'opérateur. Une fois que les paramètres exigés sont réglés et le HySTAT-A est démarré, la production de gaz est automatiquement effectué d'une façon continue. Le PCS assure les alarmes et l'enregistrement de données. Hydrogénais peut également offrir un ordinateur et un logiciel d'écran pour une visualisation plus avancée du processus de HySTAT-A. Ce système de HyStat effectue la même fonction que la borne avec l'écran mais en plus détail. Un manuel séparé est disponible avec le système de visualisation.

### **C. Générateur**

Le générateur est le système étudiant et analyser dans notre évaluation. Elle contient plusieurs composant nous allons mentionner chaque composant en détaillaient.

### **D. la pile de cellules**

Le composant principal est la pile de cellules. À l'intérieur de cette pile de cellules l'eau est décomposée à l'hydrogène et l'oxygène. La pile de cellules se compose en série de cellules circulaires. Chaque cellule se compose de deux anneaux structuraux différents, l'anneau d'hydrogène et l'anneau de l'oxygène. Ces anneaux structuraux forment les deux chambres de chaque cellule, où le procédé d'électrolyse a lieu. Les deux anneaux structuraux contiennent un canal supérieur et un canal inférieur pour la circulation de l'électrolyte et l'évacuation du gaz créé. La position de ce canal d'évacuation est différente pour les anneaux de l'oxygène et de l'hydrogène permettant aux différents gaz d'être rassemblés séparément. Entre les deux anneaux structuraux, un anneau de téflon est monté. Cet anneau de téflon rend la fuite de système serrée. Le résultat est toutes les cellules sont reliés hydrauliquement en parallèle, pourtant électriquement en série. À l'intérieur des deux anneaux structuraux en serrées, deux pré-électrodes (une anode, une cathode), un plat bipolaire et la membrane inorganique. L'hydrogène et l'oxygène sont formés respectivement à la cathode et à l'anode et empêchés de la recombinaison par la membrane. Ces pièces de base sont assemblées et comprimées dans une manière brevetée unique suivant le système de filtre-presse. "Une configuration zéro d'espace " est le résultat de ce système. Cette "configuration zéro d'espace" a comme conséquence une configuration dans laquelle la distance entre les différentes parties du processus d'électrolyte est réduite à zéro. "La configuration zéro d'espace" et la membrane inorganique unique font cela HySTAT-A est un générateur d'hydrogène très efficace d'énergie. Ceci Sans compter que, l'hydrogène est produit directement à une pression de 1000kPa

### E. Les séparateurs de gaz

Les séparateurs de gaz ont été conçus pour séparer le produit de l'hydrogène et de l'oxygène. En raison de la nécessité de l'écoulement constant, les séparateurs de gaz sont à moitié remplis d'électrolyte (Organigramme d'hydrogène). Le gaz d'hydrogène et le gaz de l'oxygène sont moins de densités par rapport l'électrolyte, ainsi ces gaz monteront avec écoulement par l'intermédiaire des collecteurs de gaz aux séparateurs de gaz. Il est crucial pour que le HySTAT-A travaille au niveau d'électrolyte dans les deux séparateurs jaillissent. Maintenir la pression dans les deux séparateurs au même niveau, déterminé à l'avance, fait la synchronisation des niveaux. Les séparateurs sont reliés au-dessous. De cette façon une différence de pression dans les séparateurs causera immédiatement une différence de niveau.

Le contrôle de cycle du processus s'assurera que la différence dans le niveau est gardée à un minimum. Il est nécessaire de surveiller les niveaux constamment pour éviter que l'hydrogène ou l'oxygène passe sur l'autre partie du séparateur de gaz, qui crée une atmosphère explosive. Un émetteur adéquat effectue cette surveillance. C'est l'ordre le plus important qui contrôle le processus complet de HySTAT-A.

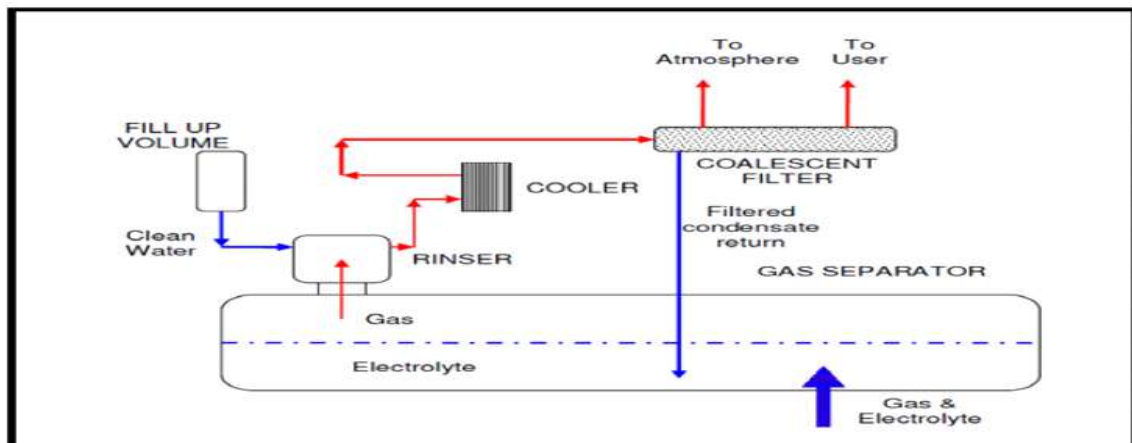


Figure II-5 : organigramme d'hydrogène.

Deux commutateurs de niveau, sur les séparateurs de gaz créent un support pour le système. Toute fois que les émetteurs détectent un hors gamme du signal, les PCS prennent la mesure appropriée pour la reconstituer à sa valeur originale. Habituellement l'ouverture ou la fermeture de la valve pour la ligne de passage de l'oxygène commandera ces niveaux. Si cette action n'a aucun effet, le HySTAT-A arrêtera et donnera l'alarme.



Figure II-6 : commutateurs de niveau.



### F. Remplisseur du volume

Ce petit cylindre d'eau est un régulateur intermédiaire pour l'approvisionnement de l'eau. Cet amortisseur permet à l'eau d'entrer à la pression atmosphérique et de protéger le système qui est pressurisé. Utilisant une série de valves, le laveur est rempli à la pression atmosphérique, d'isolement et pressurisé par le système, alors l'eau peut couler par gravitation dans l'épurateur de gaz et plus loin dans le séparateur de gaz d'hydrogène. Elle est alors isolée dans le système et mise à l'air libre avant d'être remplie une fois de plus

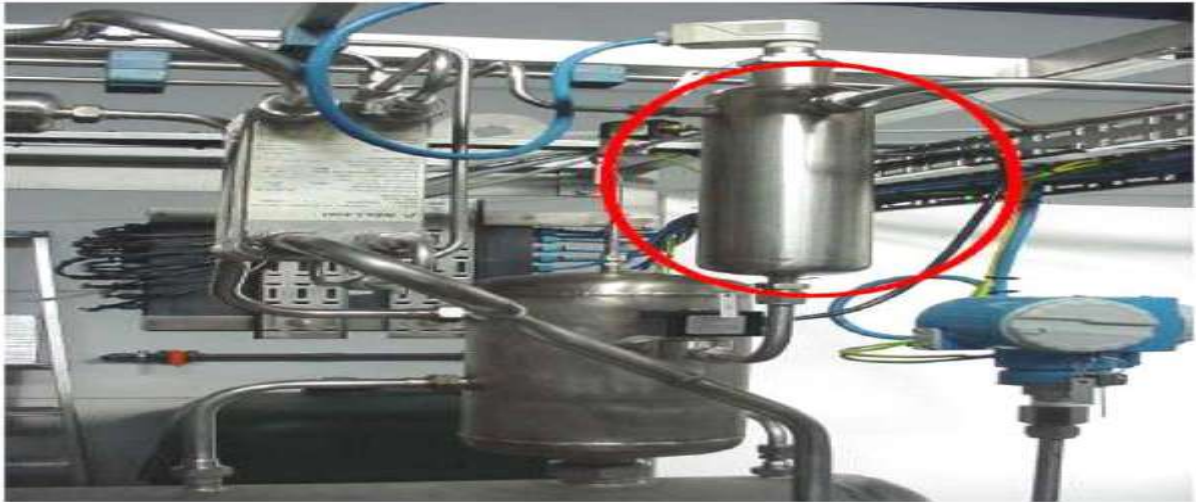


Figure II-7 : remplisseur du volume.

### G. L'épurateur de gaz ou le laveur

L'épurateur de gaz est nécessaire pour réduire le KOH de l'hydrogène produit. Dans cet épurateur de gaz, le gaz doit passer à l'emballage spécial et un bouchon liquide. Ceci est fait sous haute pression faisant le gaz rinçant très efficace. Pendant qu'il y a un approvisionnement régulier en eau propre, de la suffisance vers le haut du volume, l'efficacité du lavage est augmentée encore.



Figure II-8 : épurateur de gaz (rincer).

## H. Les échangeurs de chaleur de gaz

Les échangeurs de chaleur sont soudés par plat de nickel. La plupart des applications ont besoin de gaz sec. Le gaz venant du HySTAT-A est saturé avec de l'eau. Pour réduire la teneur en eau de l'hydrogène et de l'oxygène, les gaz traversent un échangeur de chaleur. Cet échangeur de chaleur ramènera le point de condensation du gaz à quelques degrés au-dessus de température de l'eau de refroidissement.

En raison de la basse vitesse de gaz dans les échangeurs de chaleur, l'eau condensée passera en arrière par la force de pesanteur, et ne sera pas portée avec le jet de gaz.

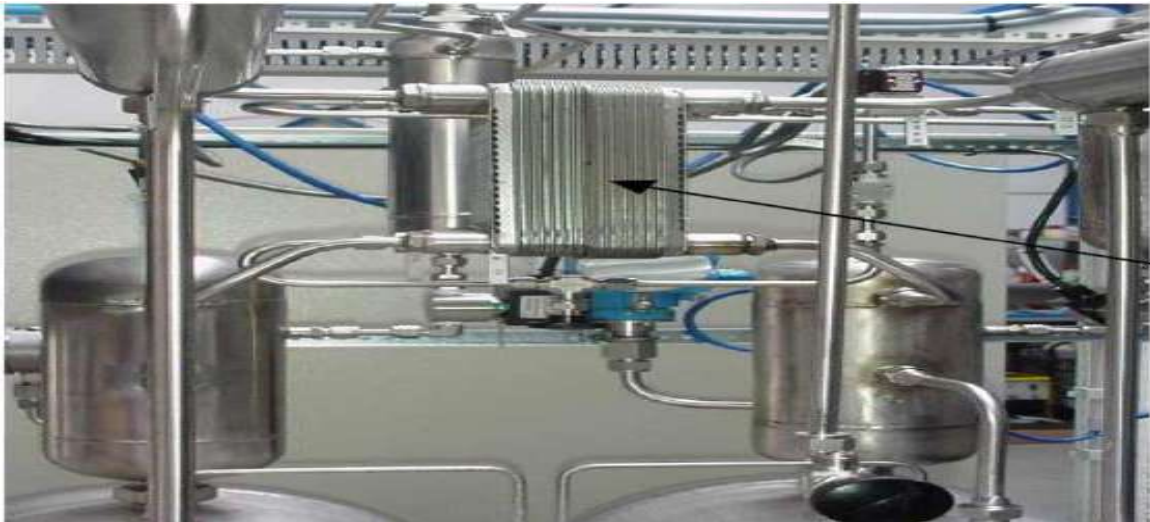


Figure II-9 : l'échangeur de chaleur.

## I. Le filtre –fusion

Après le refroidissement du gaz, celui-ci traverse un petit filtre de fusion pour enlever la plupart des gouttelettes de l'eau. Les drains rassemblés de l'eau de nouveau dans les séparateurs de gaz.

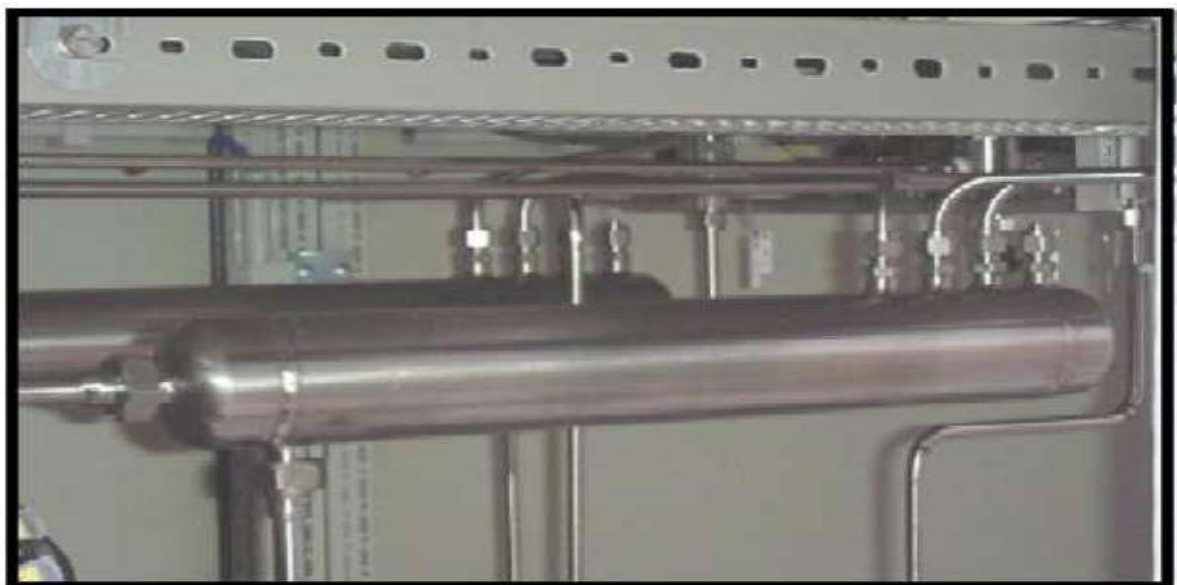


Figure II-10 : le filtre-fusion.

### J. Réservoir de coupure

Le réservoir de coupure est une petite cavité pour l'eau déminéralisée qui est installée au-dessus d'électrolyseurs. Il permet à l'eau de remplir par gravitation la partie de processus. Une deuxième fonction du réservoir de coupure est de faire une séparation claire entre le secteur dangereux et le secteur d'usage universel. L'approvisionnement en eau normalement vient d'un secteur d'usage universel et entre dans le secteur dangereux. C'est le réservoir de coupure qui s'assurera que si un parmi les valves de système tombe en panne il ne laisse pas l'hydrogène de passer vers le secteur d'usage général, mais il passe sans risque par l'intermédiaire de la ligne d'hydrogène. La taille d'un réservoir de coupure typique permettra au générateur de fonctionner à sa capacité plus élevée pendant plusieurs heures.



*Figure II-11 : réservoir de coupure.*

### K. Système de Refroidissement d'électrolyte (closed loop cooling).

L'eau de refroidissement (mélange de l'eau et de glycol) circule dans un circuit fermé et dégage sa chaleur à l'atmosphère par une refroidisseuse eau-air constitué un échangeur de chaleur et quatre ventilateurs. Dans laquelle, la chaleur produite dans générateurs d'hydrogène est libérée à l'atmosphère de façon une convection forcée. Après le refroidissement, l'eau est envoyée aux différents échangeurs de chaleur montés entre les séparateurs de gaz. Par ailleurs la chaleur, qui doit être évacuée est transférée à l'eau et à ceci de refroidissement coule de nouveau au refroidisseur sec. Une pompe est installée pour maintenir la circulation de l'eau dans le système. Une expansion intégrée d'expansion compense le plus possible de fluctuations de pression, l'installation est équipée de tous les dispositifs de sécurité nécessaires pour éviter n'importe quelle situation dangereuse pour se produire. La commande, la surveillance et la gestion du refroidissement de circuit fermée sont intégrées dans le microprocesseur du SES. Le microprocesseur est autocontrôle et conçu pour l'opération non-pilotée.

Deux exigences principales se posent pour l'exploitation aussi efficace que possible d'une tour de refroidissement :



- La diminution de la consommation de l'eau de refroidissement.
- Le renforcement de la protection de l'ensemble de l'installation contre l'augmentation de la température de l'électrolyte dans les séparateurs de gaz, et aussi de l'hydrogène et l'oxygène produits.



Figure II-12 : système de refroidissement d'électrolyte.

#### L. Système de refroidissement pour le gaz

Le générateur d'hydrogène de SES a deux circuits de refroidissement : un pour le circuit d'électrolyte et l'autre pour le refroidissement de gaz. Pendant qu'une norme de ces deux circuits sont intérieurement reliés entre eux de sorte que seulement un raccordement externe soit nécessaire. La majeure partie de la chaleur est absorbée dans les boucles de refroidissement d'électrolyte. La température maximale pour l'eau de refroidissement est de 40 C°. Il est installé pour garder la température de gaz stable. La teneur de l'eau dans le gaz sortant du système est une fonction directe de la température. La température élevée de l'eau de refroidissement aura comme conséquence de plus risque sur la condensation. Il est également important d'entrer dans une tour plus sèche avec la plus basse possible teneur de l'eau.

De cette façon la tour plus sèche sera employée plus efficacement et la régénération de la tour aura besoin beaucoup de moins d'hydrogène, grâce à la température plus basse.

Par conséquent Stuart Energie Europe peut offrir le SES avec circuit de refroidissement l'électrolyte. Le circuit raccords séparément peut être refroidi avec l'eau disponible, alors que le gaz peut être refroidi en utilisant une eau " réfrigérateur.

Ces systèmes de réfrigérateur circulent l'eau de refroidissement dans un circuit fermé et absorbent sa chaleur à l'atmosphère près. L'eau sera refroidie à une température au-dessous de la température ambiante.

#### M. Système de traitement de l'eau d'alimentation

L'eau introduite dans l'électrolyseur doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'appareil et s'accumulent au fil de l'électrolyse. Elles finissent par perturber les réactions électrolytiques par :

- Formation de boues
- Action des chlorures (les halogénures en général) qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes

Après une première épuration, l'eau traverse un filtre à charbon actif, puis subit une déminéralisation totale par passage sur un filtre à couche mixte à échangeur d'ions. On souhaite obtenir une résistivité électrique supérieure à  $2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$  (soit  $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ ). Puisque l'eau disponible ne satisfait pas la qualité demandée, un système de traitement à l'eau d'alimentation, basé sur les osmose inverse est installé en amont de SES. Ce système améliore la qualité de l'eau à un tel niveau qu'il peut être employé dans l'électrolyseur.

*Remarque :*

- La conception optimum d'un système de traitement de l'eau d'alimentation est faite sur la base des différents paramètres de l'eau à l'admission du système.*
- L'aspect de certaines impuretés peut avoir un impact sérieux sur la vie des membranes et de tout autre équipement relatif.*

### N. Purification d'hydrogène (SES Deoxo-dessiccateur 50 Nm<sup>3</sup>/h)

Le dessiccateur (deoxo) répond entièrement à des exigences de production d'hydrogène. Il apporte la pureté de l'hydrogène produit par le générateur d'hydrogène à un niveau demandé par le processus. Dans la première étape qui consiste à un chauffage à résistance (cylindre à gauche l'oxygène est éliminé. Ensuite, la deuxième étape (dessiccateurs A et B) l'humidité est enlevée de l'hydrogène. Le niveau de l'humidité et de l'oxygène peut être réduit à la quantité demandée par l'application de processus.

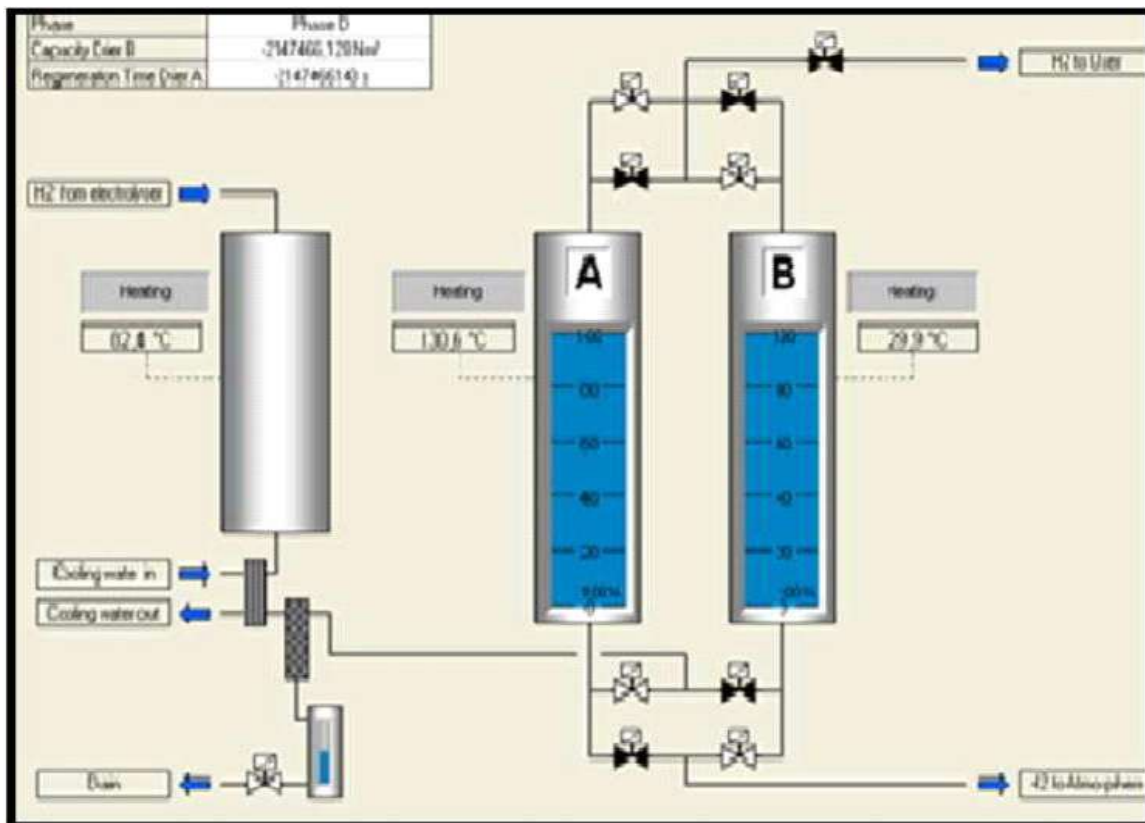


Figure II-13 : écran de contrôle de système de purification d'hydrogène.

### O. Réservoir de stockage d'hydrogène

Le réservoir de stockage satisfait les règlements du PED 97/23/EC (la directive européenne de navire de pression), le code de construction est le Hollandais d'accumulateur "règles pour des navires de pression" était un code identifié de navire de pression. Car il n'y a aucun règlement européen ou hollandais particulier pour des réservoirs du stockage d'hydrogène.

- Le corps annoncé est le bureau VERITAS.
- Le réservoir a deux trous d'inspection avec tout le raccordement du diamètre 70mm.
- Le réservoir est verticale montée sur trois jambes et a deux crochets de levage et un crochet de mise à la terre.

La surface est traitée comme suit :

- Intérieurement chimiquement nettoyé

A extérieurement tiré le ½ de SA 2, l'amorce et le blanc soufflés de cout (RAL9010)



*Figure II-14 : réservoir de stockage d'hydrogène.*

Les dimensions de réservoir présenté dans le tableau suivant :

*Tableau II-4 : dimension de réservoir d'hydrogène.*

Volume (L)	Diamètre (m)	Langueur (m)	Altitude (mm)	Hauteur total (mm)	Poids à vide (kg)
2 500	1	3.615	0.4	4.015	600

### P. Compresseur Greenfield 50 Nm<sup>3</sup>

Dans beaucoup d'application elle est nécessaire pour avoir le stockage de l'hydrogène. Puisque l'hydrogène est un gaz, la capacité de stockage est directement liée à la pression. Une bouteille par exemple contient typiquement l'hydrogène (dans Nm<sup>3</sup>) a augmenté en conséquence. Le système produit le gaz à une pression de 10bar, d'obtenir des pressions plus élevées requises pour utiliser un compresseur.

## II.4 Identification des risques dans l'atelier d'hydrogène

Durant notre stage pratique que nous avons réalisé au niveau de cette installation et selon la discussion que nous avons abordée avec les différents responsable et travailleurs et experts de système en question, nous avons identifiées les risques résumés au tableau suivant :

*Tableau II-5 : l'identification des risques liés aux équipements de l'atelier hydrogène.*

Equipement	Risque
Transformateur	Incendie
Redresseurs électriques	Incendie
Electrolyseur	Fuite H <sub>2</sub> /explosion
Séparateur	Fuite H <sub>2</sub>
	Incendie
	explosion
Compresseur H <sub>2</sub>	Incendie
	Emission
	Production de missile
Condenseur H <sub>2</sub>	Fuite H <sub>2</sub>
Pompe à vide	Incendie
	Production de missile
Ballon de stockage	Incendie/explosion

### II.4.1 L'analyse des risques par l'application de la méthode HAZOP

<b>Site :</b>	SKIKDA
<b>Process :</b>	Hydrogène
<b>Segment N 01 :</b>	Générateur (eau déminé, osmose, break tank, séparateur, électrolyse)
<b>Date :</b>	14.06.2019

N°	Paramètre	Déviations	Causes	conséquences	Barrières de sécurité	Recommandations
1.1	concentration	En Plus de concentration des ions dans l'eau déminéralisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- membrane saturée</li> <li>- Résine saturé</li> <li>- défaillance de système HS</li> <li>- défaillance de conductimètre</li> <li>- manipulation manuelle (by-pass) erreur humain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- détérioration des équipements (électrolyseurs)</li> <li>- augmentation de la tension électrique (voir armoire électrique) que peu provoque un incendie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conductimètre online</li> <li>-analyse fournisseur (vérification a la réception)</li> <li>-commande automatique</li> <li>-contrôle périodique des ECME</li> <li>-planning de maintenance préventive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* annulation de by-pass</li> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> <li>* formation de l'opérateur</li> </ul>
1.2		En Plus de concentration d'hydrogène dans l'oxygène (HTO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cellule de détection défaillante</li> <li>- dysfonctionnement de l'électrolyseur</li> <li>- l'électrolyseur marche en régime faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Risque d'explosion</li> <li>-fatalité</li> <li>-Destruction installation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-analyseur on line (avec control automate)</li> <li>- contrôle périodique des ECME</li> <li>- planning de maintenance préventive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>*Check List (verif des organes de sécurité)</li> </ul>
1.3		En Plus de concentration d'hydrogène dans l'atelier (fuite) HTA	<ul style="list-style-type: none"> <li>-fuite dans l'installation</li> <li>-défaillance cellule de détection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Risque d'explosion</li> <li>-fatalité</li> <li>-Destruction installation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- planning de maintenance préventive</li> <li>- contrôle périodique des ECME</li> <li>- Réseau anti incendie</li> <li>- Détecteur portatif avec</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> </ul>
1.4		En Plus de concentration de KOH dans la solution	<ul style="list-style-type: none"> <li>-mauvaise préparation de la solution</li> <li>-erreur de lecture du densimètre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Corrosion de l'installation</li> <li>-détérioration des équipements (projection du liquide)</li> <li>-brulure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EPI adéquat</li> <li>- Mesure de la concentration progressive</li> <li>- Instruction opérationnelle IO K PRO</li> <li>- Installation douche lave yeux rapprochée de la zone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Training du personnel</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> <li>*Installation douche lave yeux rapprochée de la zone</li> </ul>
1.5		Débit	Pas de débit d'azote	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'azote</li> <li>- séquence automate défaillante</li> <li>- vannes fermées (MVN ; HVN ; NRVN)</li> <li>- mauvaise indication du transmetteur de pression de commande PTGS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- présence d'oxygène</li> <li>- Augmentation de la pression d'H<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- planning de maintenance préventive</li> <li>- control périodique des ECME</li> <li>- pressostat (pression basse) PSL</li> </ul>



<b>Site :</b>	SKIKDA
<b>Process :</b>	Hydrogène
<b>Segment N 02 :</b>	Epuration (sécheur/ déoxo, gazomètre)
<b>Date :</b>	14.06.2019

Item	Paramètre	Déviations	Causes	conséquences	Barrières de sécurité	Recommandations
2.1	Pression	Plus de pression dans le gazomètre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- compresseur à l'arrêt</li> <li>- vanne aspiration compresseur fermée</li> <li>- by-pass bloqué ouvert</li> <li>- transmetteur défaillant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mise à l'air H2/soupapes</li> <li>- explosion si travaux à chaud à proximité (mise à l'air)</li> <li>- perte de confinement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soupape</li> <li>- HTO</li> <li>- Permis de travail</li> <li>- HTA</li> <li>- Maintenance préventive</li> <li>- Control ECME</li> <li>- Tarage soupape</li> <li>- Réseau anti incendie</li> <li>- Transmetteur de pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* Training permis de travail</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> <li>* limitation de l'accès à la zone</li> </ul>
2.2		Plus de pression dans la sortie de sécheur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retour de pression</li> <li>- Soupape défaillante</li> <li>- Clapet défaillant</li> <li>- Transmetteur de pression défaillant</li> <li>- Mise à l'air défaillant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diminution de la production</li> <li>- Mise à l'air de la suppression</li> <li>- Détérioration des équipements</li> <li>- explosion</li> <li>- déclenchement soupapes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- soupape de sécurité (SV Da H ; SV DbH)</li> <li>- Control ECME Préventive</li> <li>- réseau anti incendie</li> <li>- détecteur de feu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> </ul>
2.3	concentration	En Plus de concentration d'oxygène dans l'hydrogène OTH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement en régime bas des électrolyseurs</li> <li>- Défaillance du réacteur</li> <li>- Défaillance de l'analyseur (cellule OTH)</li> <li>- produit non conforme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arrêt compresseur et production</li> <li>- risque d'explosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Entretien préventif</li> <li>-contrôle des ECME</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> <li>* Arrêter l'installation pendant la faible demande</li> </ul>
2.4	Température	Plus de température dans le réacteur (déoxo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mauvais réglage de la résistance</li> <li>-mélange inadéquat (H<sub>2</sub> ; O<sub>2</sub>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- explosion</li> <li>- Produit non conforme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Thermostat (TS DO, TT DO)</li> <li>- Control ECM</li> <li>- Analyseur oxygène dans l'hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* Check List (verif des organes de sécurité)</li> </ul>

Site :	SKIKDA
Process :	Hydrogène
Segment N 03 :	compression
Date :	14.06.2019

Item	Paramètre	Déviation	Causes	conséquences	Barrières de sécurité	Recommandations
3.1	Pression	Plus de pression au refoulement du compresseur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- clapet anti retour bloqué RV60</li> <li>- vanne manuelle fermée HV60</li> <li>- Blocage d'un clapet du compresseur</li> <li>- Mélange O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub></li> <li>- Encrassement des filtres (GFIL 60 ET 61)</li> <li>Vanne PCV 60 bloqué ferme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- arrêt du compresseur</li> <li>- Ouverture de la soupape (PSV, 60, 20, 10, 01)</li> <li>- risque d'éclatement de la tuyauterie</li> <li>- explosion/fatalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soupape de sécurité (PSV 60, 20, 10, 01)</li> <li>- Pressostat (PSHH 60) à la sortie du compresseur</li> <li>- Pressostat (PSHH 01) aspiration compresseur</li> <li>- Pressostat (PSH 61) à la sortie du compresseur</li> <li>- Tarage des soupapes</li> <li>- Contrôle périodique d'ECME</li> <li>- Arrêt manuels d'urgence</li> <li>- Indicateurs de pression (PI 60, 20, 10)</li> <li>- Formation et évaluation de tous les opérateurs</li> <li>- Planning de maintenance préventive</li> <li>- OTH</li> </ul>	*Audit safety process
3.2	température	Plus de T° à la sortie du compresseur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mauvais refroidissement</li> <li>- Présence d'oxygène</li> <li>- Bouchage de circuit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- arrêt compresseur</li> <li>- Risque d'explosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- thermostat (TSHH 60) sortie de compresseur réglée à 120 °C</li> <li>- OTH</li> <li>- Analyseur O dans la production</li> <li>- Thermostat groupe frigo</li> <li>- Contrôle périodiques des ECME</li> <li>- Planning de maintenance préventive</li> </ul>	* audit safety process Revoir la fréquence de calibrage des analyseurs
3.3	Quantité	Plus de quantité d'huile dans la purge au niveau du déshuileur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance du compresseur (étanchéité)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- explosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-calcul de la quantité d'huile d'appoint admise (manuel constructeur)</li> <li>Formation de tous les opérateurs</li> <li>Maintenance préventive</li> <li>Purge automatique</li> <li>Purge manuelle du filtre (GFIL 61)</li> </ul>	* enregistrer les opérations de purge dans la check-list de vérification * Purge a évitée pendant la purge auto du compresseur (affichage) * Audit safety process

<b>Site :</b>	SKIKDA
<b>Process :</b>	Hydrogène
<b>Segment N 04 :</b>	Conditionnement H <sub>2</sub>
<b>Date :</b>	14.06.2019

Item	Paramètre	Déviaton	Causes	conséquences	Barrières de sécurité	Recommandations
4.1	Température	Plus de T° dans la bouteille H <sub>2</sub> (échauffement anormal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- incendie à proximité</li> <li>- Pas de vide</li> <li>- Nombre de bouteilles insuffisant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- risque d'explosion des bouteilles</li> <li>- Risque de destruction du bâtiment</li> <li>- Fatalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visite périodique des bouteilles</li> <li>- formation de tous les operateurs</li> <li>- Planning de maintenance préventive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* se doter de détecteurs infrarouges pour l'inspection de la T° des bouteilles lors du remplissage</li> <li>* audit safety process</li> <li>* note pour remplissage d'un grand nombre de bouteilles</li> </ul>
4.2	concentration	Plus de concentration de H <sub>2</sub> dans l'atelier de conditionnement de H <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuite au niveau des flexibles</li> <li>- Mauvais serrage des raccords</li> <li>- Usure des joints d'étanchéité</li> <li>- Vanne laissée ouverte</li> <li>- Robinet de bouteille fuyard (pointeau)</li> <li>- fuite sur la conduite de mise à l'air</li> <li>- Point de purge et soupape au niveau bas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- risque d'explosion risque de - - destruction du bâtiment</li> <li>- Risque d'asphyxie</li> <li>- Fatalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ventilation de l'atelier (portes ouvertes)</li> <li>- contrôle quotidien des fuites par l'eau savonneuse</li> <li>- formation de tous les operateurs</li> <li>- accès restreint et interdiction de toute source de chaleur dans l'atelier avec affichage des consignes et sensibilisation</li> <li>- Vanne d'isolement pour chaque rampe</li> <li>- Entretien préventif de l'installation</li> <li>- EPI adéquat (ADF)</li> <li>- Détecteur de H<sub>2</sub> mobile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* audit safety process</li> <li>* évaluation des operateurs</li> <li>* élevé les mises à l'air et la sortie soupape au point le plus haut</li> </ul>
4.3	pression	Plus de pression dans le circuit de remplissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fermeture des vannes</li> <li>- Soupapes bloquées ferme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-risque explosion</li> <li>- fatalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-soupape de sécurité instruction de manipulation des vannes</li> <li>- formation des operateurs</li> <li>- maintenance préventive</li> <li>- tarage soupape</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* audit safety process</li> <li>* évaluation des operateurs</li> <li>* EMOC automatise la mise à disposition du remplissage (bouteilles ; cadres ; tailler)</li> </ul>
4.4	niveau	Pas de niveau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pompe à vide HS</li> <li>- vannes ferme de pompe à vide</li> <li>- manomètre défaillant</li> <li>- Circuit fuyard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risque d'explosion</li> <li>- échauffement des récipients</li> <li>- fatalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maintenance préventive</li> <li>- contrôle des ECME</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Audit 'Safety process '</li> <li>* EMOC branchement des différents circuits (bouteilles, tailler, cadres) avec des pompes à vide</li> </ul>

<b>Site :</b>	SKIKDA
<b>Process :</b>	Hydrogène
<b>Segment N 05 :</b>	Ballon de stockage H <sub>2</sub>
<b>Date :</b>	14.06.2019

Item	Paramètre	Déviation	Causes	conséquences	Barrières de sécurité	Recommandations
5.1	pression	Plus de pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>- soupape de sécurité bloquée fermé (Mise à l'air défaillant)</li> <li>- Vanne de décharge ploque ferme</li> <li>- mauvaise indication du transmetteur de pression de commande PTGS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- explosion</li> <li>- rupture de ballon de stockage</li> <li>- fatalité</li> <li>- Risque de destruction du bâtiment.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ballon de stockage dans une espace aérien</li> <li>- maintenance préventive</li> <li>- Control des ECME</li> <li>- Détecteur de fuit H<sub>2</sub> mobile et fixe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* détecteur de fumée</li> <li>* extension automatique</li> <li>* automatiser le détecteur de fuit H<sub>2</sub> pour un coupeur direct on cas de fuit</li> </ul>
5.2		Moins de pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soupape de sécurité bloquée ouvert (Mise à l'air défaillant)</li> <li>Vanne décharge bloquée ouvert</li> <li>-Système HS défaillant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- explosion</li> <li>- rupture de ballon de stockage</li> <li>- fatalité</li> <li>- Risque de destruction du bâtiment.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ballon de stockage dans une espace aérien</li> <li>- maintenance préventive</li> <li>- Control des ECME</li> <li>- Détecteur de fuit H<sub>2</sub> mobile et fixe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* détecteur de fumée</li> <li>* extension automatique</li> <li>* automatiser le détecteur de fuit H<sub>2</sub> pour un coupeur direct on cas de fuit</li> </ul>

## II.5 Modélisation d'une rupture catastrophique sur le ballon de stockage H<sub>2</sub>

Après l'analyse de risque moyennant la méthode HAZOP, nous allons modéliser le scénario le plus critique par le logiciel PHAST afin de modéliser les conséquences des scénarios d'accidents prévisionnels dus aux surpressions (voir les résultats d'analyse HAZOP la dernière ligne). Sachant que les surpressions peuvent causer des explosions qui définissent comme suit « l'explosion c'est la transformation rapide d'un système matériel donnant lieu à une forte émission de gaz, accompagnée éventuellement d'une émission de chaleur importante ». Et dans notre étude de cas, nous allons modéliser une rupture catastrophique d'un ballon de stockage H<sub>2</sub>.

### A. Le donne d'entre sur le logiciel PHAST

Dans notre cas, les simulations par logiciel PHAST ont été effectuées en utilisant les données d'entrée présentées dans le tableau cité ci-après :

*Tableau II-6 : données d'entrée pour PHAST.*

Caractéristiques	Valeurs
Matière	Hydrogène
Masse	2.27485 kg
volume	2.5 m <sup>3</sup>
Température	18 °C
Pression	10 bar
État de fluide	Vapour
L'élévation de lieu de sortie	1.5 m
Direction de sortie en extérieur	Horizontal
Méthode d'explosion pour la modélisation	Multi-Energy
Météo	Classe 3/D
Humidité	70 %

**Remarque :** tous les données d'entre son mentionner dans l'annexe page 69-72

### B. Résultats et discussion de simulations PHAST

Nous avons utilisé les valeurs de référence pour les installations classées dans l'Arrêté française du 22/10/04 est sont les suivantes :

Tableau II-7 : seuils des effets de surpressions sur l'homme sur la structure.

Seuils d'effets surpression		Effet/dommage
Sur les structures	0.02 bar	seuil des destructions significatives de vitres
	0.05 bar	seuil des dégâts légers sur les structures
	0.14 bar	seuil des dégâts graves sur les structures
	0.2 bar	seuil des effets domino
	0.3 bar	seuil des dégâts très graves sur les structures
sur l'homme	0.02 bar	seuils des effets irréversibles/effets indirects par bris de vitre sur l'homme
	0.05 bar	seuils des effets irréversibles significatifs pour la vie humaine
	0.14 bar	seuil des premiers effets létaux graves pour la vie humaine
	0.2 bar	seuil des effets létaux significatifs très graves pour la vie humaine

Tableau II-8 : seuils des effets thermiques sur l'homme et sur la structure.

seuils d'effets thermiques		Effet/dommage
Sur les structures	5 kW/m <sup>2</sup>	seuil des destructions significatives de vitres
	8 kW/m <sup>2</sup>	seuil des effets domino au seuil de dégâts graves sur les structures
sur l'homme	3 kW/m <sup>2</sup>	seuil des effets irréversibles significatifs pour la vie humaine
	5 kW/m <sup>2</sup>	seuil des premiers effets létaux graves pour la vie humaine
	8 kW/m <sup>2</sup>	seuil des effets létaux significatifs très graves pour la vie humaine

Les résultats de modélisation de phénomène rupture catastrophiques d'un ballon H2 donnent deux types d'effets ; effet thermique (deux phénomènes dangereux qui sont jet enflammé et boule de feu) et effet de surpression ; par le présent paragraphe, nous présentons leurs résultats de modélisations.

#### ❖ *Modélisation des effets thermiques*

##### ➤ **Résultats et modélisation de jet enflamme**

Tout d'abord, il faut bien défini le phénomène de jet enflammé ; c'est une flamme caractérisée par une diffusion turbulente résultant de la combustion d'un combustible libéré en continu dans une direction particulière. Il se caractérise généralement par :

- la production de chaleur résultant des réactions chimiques exothermiques de la combustion qui se transmise à l'environnement sous trois formes : la convection, la conduction et le rayonnement.
- son aspect chimique lié aux nombreuses réactions chimiques qui se déroulent simultanément au cours de la combustion entre l'oxygène de l'air (comburant) et les



gaz de combustion (combustibles). Les réactions chimiques produisent généralement du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, de la vapeur d'eau, et les produits imbrulés.

Le résultat de modélisation de phénomène jet enflammé présenté par le Tableau II-9 : Distance de concentrations dans la direction du vent zones d'effets par la Figure II-15 : zone d'effet thermique de phénomène jet enflammée.

Tableau II-9 : Distance de concentrations dans la direction du vent

<b>Chemin</b>	Hydrogène \ Étude \ vaisseau pression
<b>scénario</b>	Catastrophique rupture
<b>Météo</b>	classe 3/D
<b>Distance de Limite inférieure d'inflammabilité sur le vent [m]</b>	5.03071
<b>Distance de fraction à la Limite inférieure d'inflammabilité [m]</b>	7.6779



Figure II-15 : zone d'effet thermique de phénomène jet enflammée.

Les résultats de la simulation du jet enflamme avec le logiciel PHAST sont représentés à la Figure II-15 : zone d'effet thermique de phénomène jet enflammée. En prenant en considération les conditions météorologiques nuit venteuse.

Cette figure illustre les contours d'effets relatifs aux différents seuils références de radiations thermiques sur la carte satellite du Linde-gas Skikda. Ces résultats montrent que la majorité des opérateurs au niveau de l'atelier d'hydrogène sont exposée à des atteintes corporelles graves dues aux effets thermiques (seuil des premiers effets létaux graves pour la vie humaine pour le seuil 5 kw /m2) car la distance d'effet atteint à 7.67 m.

Également, l'effet grave atteint les autres équipements de l'atelier d'hydrogène (générateur d'hydrogène et leur composant) sont exposés à des dégâts matériels significatifs avec la possibilité de provoquer des effets domino (les équipements cible peuvent provoquer un accident à une gravité égale ou plus les premiers accidents). En effet, la distance d'effet



atteint 5.03m pour le seuil 8 kw /m2 (seuil des effets domino au seuil de dégâts graves sur les structures).

### ➤ Résultats de la boule de feu

L'effet thermique résultats de l'explosion due également à la boule de feu, sachant que nous avons prenant ont considération des conditions météorologiques nuit venteuse. Et les résultats sont présentés par le Tableau II-10 : diamètre de la boule de feu. Et la Figure II-16 : zone d'effet thermique due à la boule de feu.

Tableau II-10 : diamètre de la boule de feu.

<b>Chemin</b>	Hydrogène\ Étude \ vaisseau pression
<b>scénario</b>	Catastrophique rupture
<b>Météo</b>	classe 3/D
<b>Diamètre de la boule de feu [m]</b>	8.46417
<b>Distance (3 kW/m<sup>2</sup>) [m]</b>	22.47
<b>Distance (5 kW/m<sup>2</sup>) [m]</b>	28.83
<b>Distance (8 kW/m<sup>2</sup>) [m]</b>	37.39

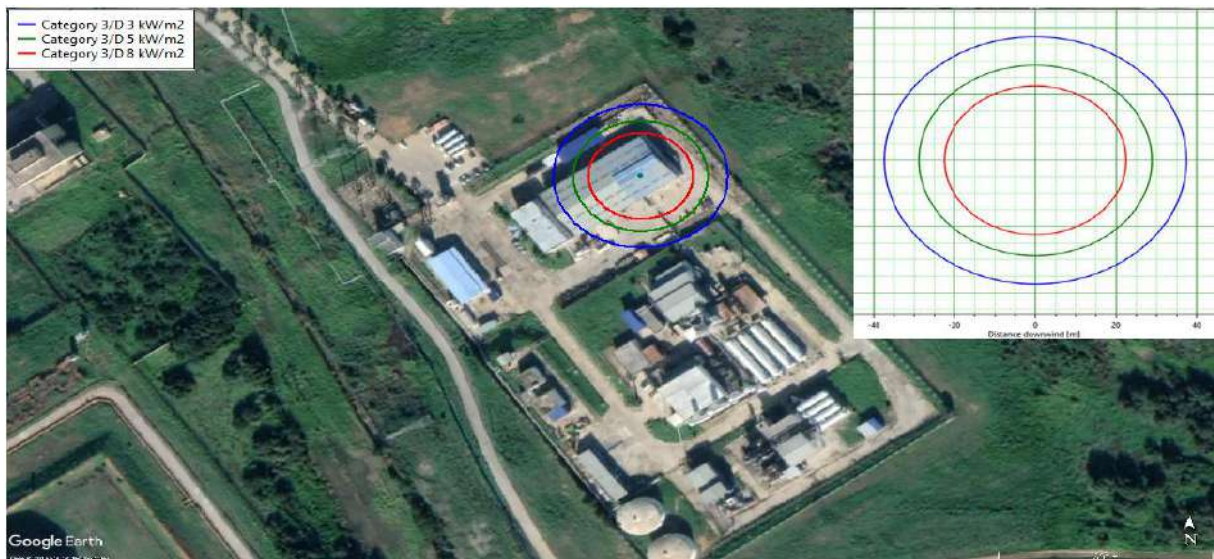


Figure II-16 : zone d'effet thermique due à la boule de feu.

Cette figure illustre les contours d'effets relatifs aux différents seuils références de radiations thermiques sur la carte satellite du Linde-gas Skikda, et le diamètre de la boule de feu 8.5m comme illustre dans le tableau...

Les résultats des zones d'effet présentent par la Figure II-16 : zone d'effet thermique due à la boule de feu., montrent que tous les opérateurs dans un cercle de rayon 22.5 m - travailleur d'atelier mécanique et d'hydrogène - (le ballon de stockage H2 c'est le centre de ce cercle) sont exposée aux seuils d'effet de 8 KW /m2 (c'est le seuil des effets létaux significatifs très graves pour la vie humaine). Pour les effets sur les structures touché qui sont : l'atelier de mécanique avec une partie de l'unité de conditionnement, le parc de stockage des bouteilles d'hydrogène jusqu'à 70 bouteilles avec une pression 150 bars... etc.), Ces unités sont des

cibles qui peuvent provoquer des accidents graves avec des dégâts graves car, c'est le seuil d'effet domino.

Après la distance de 22.5 m, nous avons une distance de 6.5 m avec un seuil 5 kw /m2. D'autre part, les opérateurs sont exposés à des premiers effets létaux graves pour la vie humaine. Et d'autre part, L'effet thermique sur les structures (une partie d'ateliers de conditionnement, le parc de stockage des produits chimiques, le parc de stockage d'hydrogène, l'atelier mécanique...etc.) est limité à des destructions de vitres significatives.

Et enfin, pour les seuils d'effets de 3 kw /m2 à 37 m, les opérateurs ne sont exposés aux effets irréversibles significatifs pour la vie humaine, mais aucun effet sur la structure.

### ❖ Résultats d'effet surpression

Distance de surpressions dans la direction de vent, Les résultats de la simulation de l'effet surpression avec le logiciel PHAST, sont représentés à la Figure II-17 : distances d'effets de surpression. En prenant en considération les conditions météorologiques nuit venteuse.

Tableau II-11: distance d'effet surpression de chaque seuil.

Chemin	Hydrogène\ Étude \ vaisseau pression
scénario	Catastrophique rupture
Météo	classe 3/D
Distance de surpression dans la direction de vent 1 (0.02 bar) [m]	81.4914
Distance de surpression dans la direction de vent 2 (0.05 bar) [m]	35.5971
Distance de surpression dans la direction de vent 3 (0.14 bar) [m]	15.1929
Distance de surpression dans la direction de vent 4 (0.2 bar) [m]	11.7828
Distance de surpression dans la direction de vent 5 (0.3 bar) [m]	9.07962

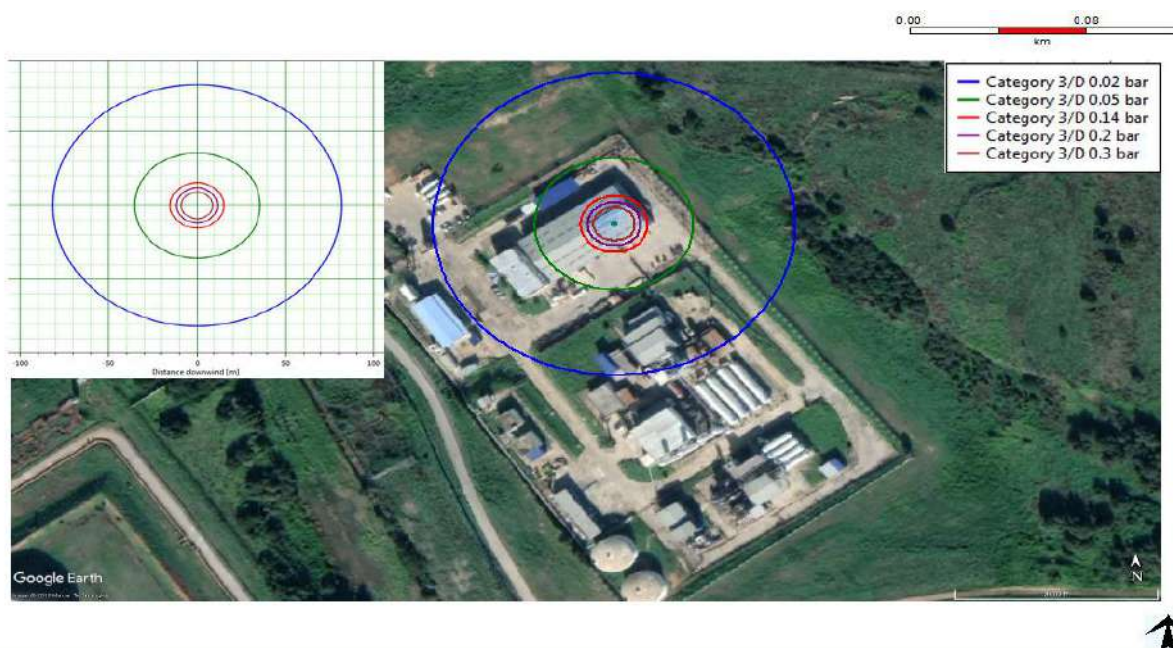


Figure II-17 : distances d'effets de surpression.

Cette figure illustre les contours d'effets relatifs aux différents seuils références de surpression, avec la distance de chaque seuil sur la carte satellite du Linde-gas Skikda.

Tous les opérateurs au niveau de l'atelier d'hydrogène (rayon de cercle de zone d'effet de 9 m à partir le ballon de stockage H<sub>2</sub>) sont exposé au seuil d'effet de surpression 0.3 bars ; le seuil mortel pour l'homme, avec des dégâts très graves sur les structures (destruction totale de l'unité d'hydrogène).

Puis, après une distance de 2.7m (9+2.7 m), les opérateurs dans cette zone sont exposé à un seuil de surpression 0.2 bars ; des effets létaux significatifs très graves pour la vie humaine, et pour la structures c'est le seuil des effets domino et les unités touché sont les suivant : parc de stockage des bouteilles d'hydrogène jusqu'à 70 bouteilles avec une pression 150 bars.

Et pour le seuil 0.14 bars, nous avons une distance de 3 m ; d'un part, pour l'effet sur l'homme correspondant aux premiers effets létaux graves pour la vie humaine, et d'autre part, c'est le seuil grave sur les structures correspondant à la zone des dangers (l'atelier d'hydrogène, parc de stockage des bouteilles d'hydrogène, atelier mécanique).

De même, pour le seuil de surpression de 0.05 bars avec une distance de 20.5 m après la distance d'effet de seuil 0.14 bars. Pour l'homme, ils ont exposé aux effets irréversibles pour la vie et pour les effets sur la structure c'est le seuil d'effet des dégâts léger.

Et enfin, la distance d'effet de surpression égale à 81m (à partir le ballon de stockage H<sub>2</sub>) pour les seuils d'effets de surpression de 0.02 bars, pour la structure nous avons des destructions significatives de vitres et concernant les effets sur l'homme, les opérateurs sont exposés à des effets irréversibles indirects par bris de vitres.

## II.6 Conclusion

*Par le présent chapitre, nous avons présenté le site du stage pratique et le système étudié, puis nous avons fait une analyse de risque par la méthode HAZOP, d'après l'étude HAZOP, nous avons retenu que la surpression c'est le scénario le plus critique et à cet effet, nous avons fait appel au logiciel de modélisation des conséquences des phénomènes dangereux c'est le logiciel PHAST, et nous avons trouvé des effets thermiques et des effets de surpression et par conséquent, nous avons calculé les distances d'effets afin de bien comprendre ces phénomènes et leur criticité pour un meilleur maitrise de ces phénomènes ou risque.*

# III Chapitre 3

Etude perspective pour la transition a l'utilisation d'hydrogène comme énergie en Algérie



### III.1 Introduction

*Les crises énergétiques récurrentes, les préoccupations environnementales locales et globales, l'irrésistible montée des inégalités énergétiques mondiales et de la précarité énergétique montrent les limites d'un système basé presque uniquement sur les questions de production d'énergie et leurs conséquences. Dans ce contexte, la transition énergétique reconnue aujourd'hui comme indispensable et urgente, la prise en compte simultanée des questions de maîtrise des besoins, d'intégration des énergies renouvelables, l'aménagement de territoire apparaît comme des composantes majeures de la réflexion et de l'action pour une transition énergétique.*

*Dans ce chapitre, nous allons souligner l'idée d'utiliser l'hydrogène comme énergie. Et quel est les moyens et l'endroit le plus efficace de produire en Algérie à partir d'énergies renouvelables. Ainsi que la façon dont il est exploité en tant qu'énergie et quelles sont ses applications actuelles dans le monde entier.*

### III.2 Transition énergétique

La transition énergétique désigne l'ensemble des transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie effectuées sur un territoire dans le but de le rendre plus écologique. Concrètement, la transition énergétique vise à transformer un système énergétique pour diminuer son impact environnemental.

Correctement désigne la phase de transformation qui doit permettre de passer progressivement d'un système énergétique basé essentiellement sur les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel, matières radioactives), qui sont par nature limitées, à des sources énergétiques moins centralisées, diversifiées et renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, géothermique, marémotrice, biomasse, etc.).

Cette transition est indissociable de l'efficacité et de la sobriété énergétique (moteurs, ampoules électriques, bâtiments mieux isolés, etc.) et concernera presque toutes les activités humaines (transports, industries, éclairage, chauffage, etc.). La transition énergétique est rendue indispensable en raison de :

- l'épuisement inéluctable des ressources fossiles,
- la lutte contre le réchauffement climatique provoqué par les gaz à effet de serre provenant majoritairement de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel,
- la pollution et ses conséquences sur l'environnement et la santé humaine de l'exploitation de l'utilisation des énergies fossiles.

A cela, s'ajoute, pour les partisans de la sortie du nucléaire, les risques liés à la sécurité et au vieillissement des centrales nucléaires.

La transition énergétique est l'une des composantes de la transition écologique et l'un des enjeux majeurs du développement durable ou soutenable. Elle se décline de manière différente selon les pays. Elle contribuera aussi à sécuriser les approvisionnements en énergie et à accroître l'indépendance énergétique des pays disposant de peu de ressources fossiles. Elle permettra également de réduire les tensions géopolitiques dues aux inégalités dans la répartition des ressources fossiles dans le monde. [18]

La transition énergétique dans laquelle s'engage l'Algérie s'inscrit dans les évolutions de la situation énergétique régionale et mondiale. Cette situation est marquée par la consommation croissante d'énergie et le recours croissant aux énergies fossiles (pétrole, gaz naturel), malgré leur caractère épuisable à long terme et les conséquences de leur utilisation, qui accélère notamment le changement climatique. La Maitrise de la Demande de l'Energie (MDE) s'impose comme une nécessité face à la demande accrue d'une part et à la rareté des ressources d'autre part, ainsi qu'aux enjeux environnementaux. La maîtrise de l'énergie nécessite une caractérisation des ressources énergétiques à l'état actuel et la connaissance des principaux secteurs consommateurs d'énergie. Garantir un approvisionnement propre et durable en énergie dans une vision de long terme devient une nécessité grandissante qui dépend étroitement des décisions prises aujourd'hui. Sous l'effet de l'augmentation de la consommation nationale en énergie primaire et la demande surtout en énergie électrique pendant les dernières années, de nouvelles solutions doivent être proposées dont la volonté d'assurer une meilleure adéquation entre l'offre et la demande énergétique. Dans ce cadre et pour tracer les effets à long terme de mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement, il est incontournable de s'appuyer sur des modèles de prospective énergétique. Les modèles de prospective énergétique constituent une alliée précieuse dans l'aide à la décision. Dans une vision de long terme et en intégrant l'ensemble des facteurs économiques et politiques, ils permettent de tracer une image cohérente des systèmes énergétiques. [19]

### III.3 Pourquoi prépare le pré pétrole en Algérie

Les conséquences de la perte brutale des revenus des hydrocarbures qui vont diminuer considérablement la fiscalité pétrolière, ce qui conduirait à une dépréciation du dinar pour pallier l'insuffisance des ressources en devises afin d'affronter la conjoncture avec toutes les conséquences que cela induirait sur le pouvoir d'achat, ceci d'autant plus qu'une grande partie de l'offre provient de l'importation qui absorbe déjà près de 80% de nos recettes pétrogazières et non pas de la production qui risquerait aujourd'hui un problème sérieux sous l'effet du contexte international actuel qui s'est assombri brutalement avec la chute brutale du prix du baril de pétrole sans pour autant espérer une alternative.

Car, faut-il le rappeler, faute d'avoir développé une économie hors hydrocarbures qui ne représente que 2% dans la structure des revenus du pays. Si on se tient aux dernières mesures du gouvernement, en dépit de la baisse drastique des prix du baril de pétrole, l'État entend maintenir le même rythme de ses efforts pour le confortement de sa politique sociale et d'investissement dans les infrastructures et des équipements collectifs.

À cet égard, tous les Algériens se rappellent de cette chute énorme des prix du pétrole qui a mené notre pays vers une grande crise socioéconomique des années 1986/1990, provoquant la liquidation de près d'un millier d'entreprises, l'explosion du chômage de près de 30%, l'inflation de près de 25% et enfin l'explosion sociale concernant la tragédie nationale du 5 Octobre 1988. Nous assistons depuis à un immobilisme économique en termes d'investissements industriels, de croissance hors hydrocarbures, de création d'emplois durables, d'inflation en évolution frappent de plus en plus durement l'économie nationale et la société en général avec finalement, explosion de mécontentement des couches sociales, des phénomènes de violence, d'immolation, harraga, de scandales en série de corruption qui

se sont généralisés et internationalisés restant d'une grande actualité nationale comme on a pu le constater ces dernières temps.

L'Algérie, dont la richesse est aujourd'hui essentiellement constituée des pétrodollars. En effet, la dépendance chronique du budget de l'État des recettes des hydrocarbures et notre économie n'arrive toujours pas à produire suffisamment et à parvenir à développer l'offre et à générer suffisamment de richesses, d'emplois et de technologies due essentiellement au manque de l'ordre dans le gouvernement des entreprises algériennes et d'ambitions des dirigeants d'entreprises, notamment les entreprises publiques économiques continuent d'être un fardeau pour le Trésor public. [20]

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. [21]

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

Le programme des EnR (le programme des énergies renouvelables) est défini ainsi pour les différentes phases [21]:

- d'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW
- à l'horizon 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée
- d'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW
- d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

La synthèse de ce programme, par type de filière de production, se présente comme suit :

### III.3.1 Energie Solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. [21]



### III.3.2 Energie Solaire Thermique

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solaire thermique. Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune seront lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire.

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

### III.3.3 Energie Eolienne

Le programme EnR (le programme des énergies renouvelables) algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées. Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW. [21]

## III.4 Motivation pour l'hydrogène comme une alternative énergétique

Dans le cadre du développement durable, le système d'approvisionnement en énergie est un thème crucial. Encouragé par le Protocole de Kyoto, l'intérêt pour la définition de programmes d'économie d'énergie et pour la promotion de technologies respectueuses de l'environnement telles que les énergies renouvelables, augmente. À plus long terme cependant des alternatives supplémentaires doivent être trouvées. La concordance de la diminution supplémentaire des émissions (CO<sub>2</sub>, NOX,...) avec la sortie du nucléaire, est un défi important. Au niveau international, l'hydrogène comme vecteur d'énergie est l'un des sujets principaux des discussions des voies conduisant vers une future société à l'énergie durable. On s'attend à ce qu'il contribue à la fois à la réduction de la pollution atmosphérique, à la réduction du CO<sub>2</sub> et à la stabilité de l'approvisionnement en énergie. La raison de cela est que l'hydrogène offre un potentiel à long terme pour des systèmes énergétiques, avec un niveau d'émission presque nul il peut être basé sur des sources d'énergie locales et renouvelables. Aux Etats-Unis, une «feuille de route vers l'hydrogène» a déjà été développée tandis que récemment, au niveau européen, un plan d'action «Hydrogène et piles à combustibles, une vision pour notre avenir» a été présenté. Au niveau de la politique algérien de l'énergie, les connaissances sur l'hydrogène sont plutôt limitées.

De nos jours, les différentes sources d'énergie disponibles pour satisfaire notre quotidien se sont révélées sûres, fiables, mais à moyen terme. Différentes préoccupations ont motivé chercheurs et organismes à l'échelle locale et dans le monde, afin de proposer d'autres alternatives aux énergies éphémères (pétrole, charbon...).

L'hydrogène, comme vecteur d'énergie, a occupé l'esprit de la nouvelle génération du génie énergétique, ainsi que des néo-environnementalistes. L'idée de l'hydrogène comme source d'énergie va encore plus loin : face à un souci mondial de rupture des gisements fossiles à moyen terme, face au souci de la quasi-dépendance de l'industrie et des foyers à l'électricité

du fossile, l'hydrogène s'impose comme la source propre et inépuisable, et c'est ce qui nous motive au centre de développement des énergies renouvelables.

L'hydrogène se caractérise par une série de propriétés intéressantes à exploiter dans une logique environnementale. C'est en effet un gaz :

- Présent en abondance sur la Terre (et le plus naturellement présent dans l'univers)
- Non polluant car sa combustion n'induit qu'une production de vapeur d'eau.
- Caractérisé par une densité énergétique remarquable : l'énergie contenue dans 1 kg d'hydrogène équivaut à celle de 2,8 kg d'essence.
- A l'inverse des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, l'hydrogène n'est pas tributaire de conditions météorologiques. Son utilisation pourrait venir en renfort aux énergies vertes à intermittence tout en constituant en théorie une alternative idéale aux énergies fossiles.
- Les voitures utilisant l'hydrogène (ou plus précisément une pile à hydrogène) sont beaucoup plus silencieuses que celles utilisant un moteur à explosions (moteur à combustion interne). L'utilisation de ces piles à hydrogène pourrait donc constituer une alternative durable aux pollutions sonores engendrées par les transports dans les villes.

Il peut être stocké longtemps et n'est pas influencé par le facteur de temps, ce qui constitue la base du stockage d'énergie.

### **III.5 Potentialité de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelable**

Electricité verte est l'électricité décarbonée obtenue à partir d'une énergie renouvelable inépuisable : énergie éolienne, photovoltaïque ou hydraulique qui ne rejette pas de gaz à effet de serre, ni de polluants, ni de particules et l'hydrogène vert, est l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité verte.

#### **III.5.1 Production de l'hydrogène**

Si dans la nature se trouve très peu d'hydrogène à l'état libre sous forme de molécules  $H_2$ , il est en revanche très abondant à l'état combiné surtout dans l'eau (associé à l'oxygène) et dans les hydrocarbures (associé au carbone). [22]

Les énergies renouvelables sont une source d'énergie souhaitée pour la production d'hydrogène en raison de leur diversité, de leur abondance et de leur potentiel de durabilité. L'hydrogène renouvelable est principalement une option économique dans les pays dotés d'une base de ressources renouvelable importante et / ou d'un manque de ressources fossiles, dans les zones reculées et peu peuplées ou pour stocker le surplus d'électricité provenant d'énergies renouvelables intermittentes. L'hydrogène peut être produit en divisant l'eau en éléments constitutifs à l'aide d'un procédé appelé électrolyse, qui nécessite de l'électricité. L'un des avantages de l'électrolyse de l'eau est qu'il est compatible avec une grande variété de technologies d'énergie renouvelable disponibles, notamment l'énergie solaire, hydroélectrique, éolienne, vagues, géothermique, etc. échelles (sur site et hors site), sa plus grande maturité, sa compacité, sa densité de courant élevée et son encombrement réduit.

### III.5.2 Production H<sub>2</sub> à partir d'électricité photovoltaïque

La manière la plus directe consiste à utiliser un champ photovoltaïque pour générer un courant continu qui alimente directement un stack d'électrolyse. Cette configuration nécessite l'utilisation d'un convertisseur DC/DC permettant de réguler le champ photovoltaïque tout en alimentant l'électrolyseur.

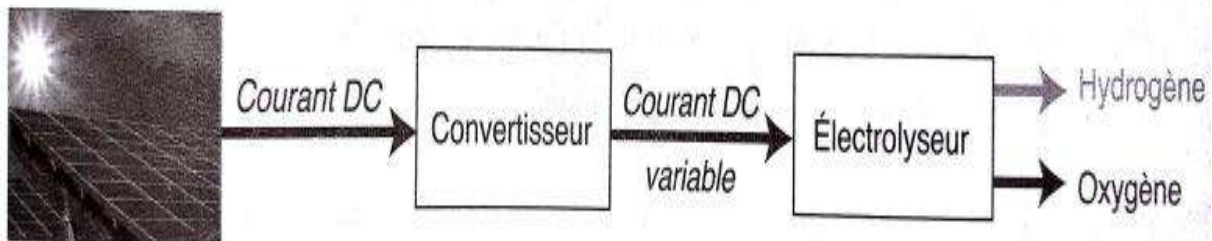


Figure III-1 : schéma de principe d'un couplage direct PV-électrolyseur [22].

Cette architecture permet théoriquement d'atteindre le meilleur rendement de conversion puisque le courant continu est directement envoyé sur le stack d'électrolyse. Toutefois, afin d'éviter des pertes en ligne trop importants, l'électrolyseur doit être localisé près de la zone de production photovoltaïque. Ce mode de production est tout particulièrement adapté pour le stockage de l'énergie pour les sites autonomes (relais télécom, site isolé...) pouvant nécessiter une alimentation ininterrompue d'une application. De même, ce mode de production trouve tout son intérêt dans les pays où aucun tarif préférentiel de rachat de l'électricité photovoltaïque n'est en vigueur. L'électricité produite peut être utilisée de manière déportée. L'idée consiste à réinjecter l'électricité produite par le champ photovoltaïque sur le réseau général. Cette approche permet de découpler le site de production photovoltaïque de la production d'hydrogène.

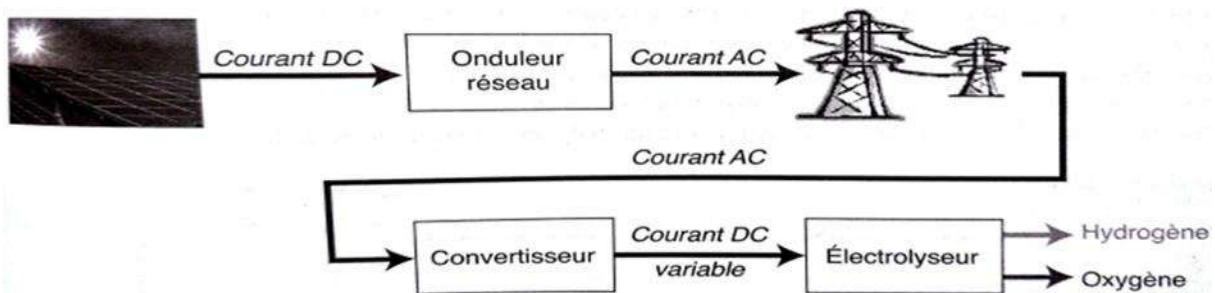


Figure III-2 : schéma de principe d'un couplage déporté PV-électrolyseur [22].

Cette architecture nécessite la mise en œuvre de plusieurs étapes de conversion AC/DC, ce qui peut se traduire par un rendement de conversion inférieur au mode précédent. Ce mode de production est principalement adapté à la production centralisée d'électricité à partir de champs photovoltaïques de plusieurs centaines de kW. [22]

### III.5.3 Production de H<sub>2</sub> à partir d'électricité éolienne

Comme pour la production d'origine photovoltaïque, il est possible d'utiliser localement l'électricité (tout ou partie) produite par une éolienne pour de l'hydrogène. Le

Le courant continu pour l'alimentation de l'électrolyseur peut être prélevé directement au niveau d'un convertisseur DC/DC localisé dans l'éolienne. Il est à noter que l'interface entre la génératrice de l'éolienne et l'électrolyseur dépend de la technologie utilisée par le constructeur de l'éolienne. En effet, la faisabilité peut être plus ou moins grande en fonction des choix technologiques du constructeur.

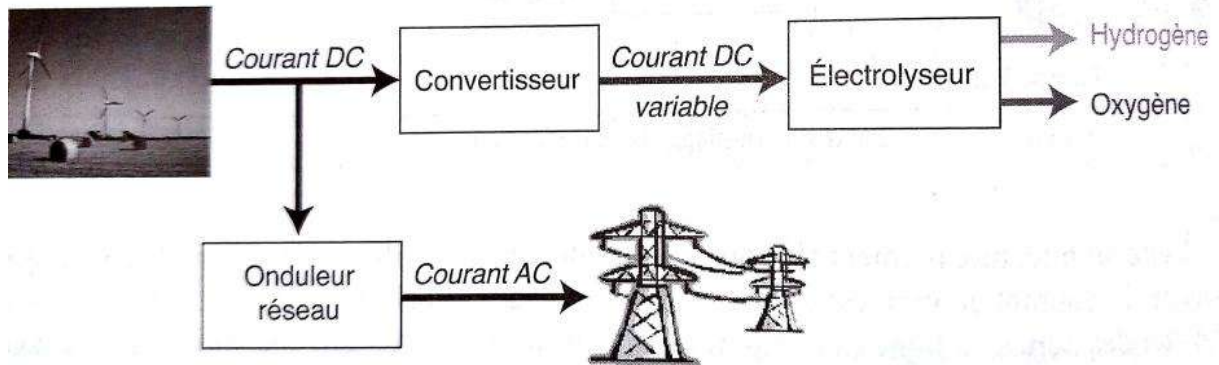


Figure III-3 : schéma de principe d'un couplage déporté éolien - électrolyseur. [22]

Il est également possible de renvoyer sur le réseau une partie de l'électricité produite par l'éolienne. Cette approche nécessite bien sûr que l'électrolyseur soit localisé près de l'éolienne. Elle est adaptée au lissage de la production électrique et permet en cas de déconnection du réseau des éoliennes de stocker l'énergie produite sous forme d'hydrogène. Des configurations hybrides peuvent être également envisagées si l'on ne considère pas uniquement la production électrique générée par une seule éolienne mais par un parc éolien. L'électricité d'origine éolienne peut également être utilisée de manière déportée. Ce mode de production consiste à injecter sur le réseau la totalité de la production électrique de l'éolienne et d'utiliser cette électricité pour alimenter un électrolyseur installé loin de la zone de production. [22]

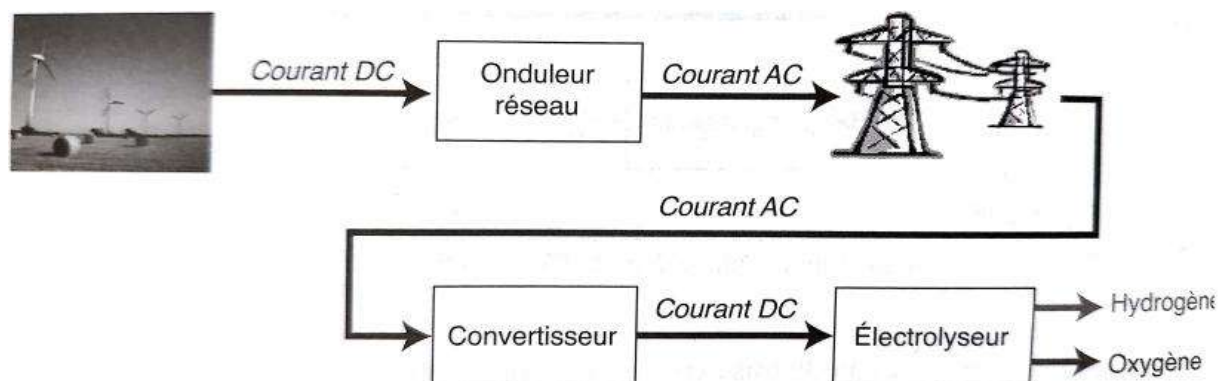


Figure III-4 : schéma de principe d'un couplage déporté éolien - électrolyseur. [22]

### III.6 Choix de site favorable de production l'hydrogène en Algérie à partir des énergies renouvelables

Le choix de site favorable pour la production d'hydrogène est basé sur l'estimation du meilleur site de production d'électricité à partir de ces sources ; est un changement de la quantité d'électricité vers une quantité d'hydrogène, par l'utilisation des équations. Cette étude élaborée par Dr. rahmouni soumia.



### III.6.1 Production H<sub>2</sub> à partir d'électricité photovoltaïque

La figure suivante représente la carte du potentiel d'hydrogène produit à partir de l'énergie solaire en utilisant les panneaux photovoltaïques mono-cristallins considérés. Pour tous les résultats, l'unité de potentiel est des tonnes d' H<sub>2</sub> par km<sup>2</sup> par an.

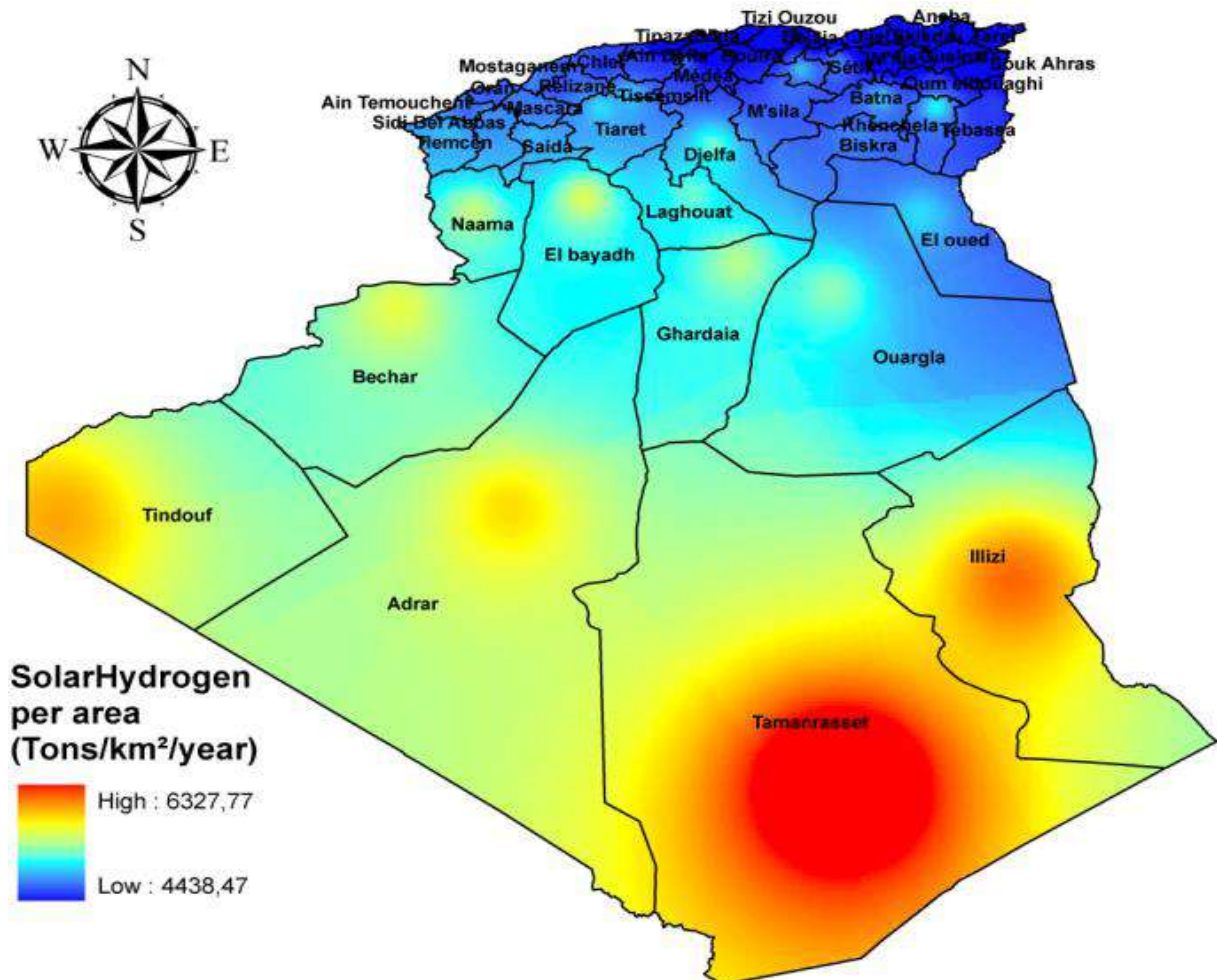


Figure III-5 : potentiel d'hydrogène solaire. [23].

"Le potentiel de production d'électricité solaire et de l'hydrogène solaire est directement proportionnel ; La région qui a le potentiel de production d'électricité le plus élevé a donc la production d'hydrogène la plus estimée. A l'échelle nationale, le potentiel de la production d'hydrogène solaire est estimé à 0.24 Mt/km<sup>2</sup> annuellement, dont la production varié entre 4437 et 6327 tonnes/km<sup>2</sup>. En fait, l'estimation de l'hydrogène solaire dans le pays ne présente pas de différences importantes entre toutes les régions. En outre, le plus grand potentiel de production d'hydrogène solaire sur l'ensemble du territoire est situé dans le sud de l'Algérie". [23]

### III.6.2 Production de H<sub>2</sub> à partir d'électricité éolienne

L'hydrogène éolien est essentiellement la génération d'hydrogène par électrolyse où l'électricité fournie provient des éoliennes. La figure suivante montre la carte du potentiel annuel de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne sur la superficie de chaque région.





à 22.29 autres stations-service sont en construction ou seront mis en service prochainement en Allemagne, surpassant les Etats-Unis avec 24 stations en cours de construction. Dans le monde entier, les sites pour les 90 stations à venir ont déjà été annoncés. Selon les renseignements recueillis par LBSTLudwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) qui est un organisme expert international pour l'énergie durable et de la mobilité, un total de 106 stations-service hydrogène fonctionnent actuellement en Europe, 101 en Asie, 64 en Amérique du Nord, deux en Amérique du Sud et une en Australie. 188 stations sont accessibles au public comme n'importe quelle station de commerce de détail conventionnel. L'an dernier plusieurs stations anciennes provenant de projets de démonstration limitée ont été remplacées par des stations publiques modernes, montrant la commercialisation croissante de l'infrastructure de l'hydrogène (tuev-sued, 2016). Pour l'installation de stations-service hydrogène, nous pouvons citer deux scénarios, à savoir : remplacement des stations conventionnelles par stations-service hydrogène ou l'installation de nouvelles stations-service hydrogène. Nous pouvons rencontrer différents modes d'approvisionnement pour ce nouveau type de stations-service :

- ❖ Livraison sous forme liquide.
- ❖ Livraison sous forme gazeuse.
- ❖ Production sur site suite à une électrolyse.
- ❖ Production sur site selon un processus de vaporeformage.

Une classification de station-service hydrogène est basée sur la source d'énergie primaire et les procédés utilisés pour produire de l'hydrogène. Nous pouvons citer deux types de station-service hydrogène ; la première est la station dans laquelle l'hydrogène est fabriqué ailleurs et livré à la station pour le stockage local et la distribution, la deuxième est la station dans laquelle l'hydrogène est fabriqué sur site et puis stocké pour le transfert aux véhicules-hydrogène (voir la). Certaines stations peuvent être une combinaison des deux types utilisant l'hydrogène livré en complément de la production sur site selon les besoins. La production distribuée peut être l'approche la plus viable pour l'introduction de l'hydrogène à court terme en partie parce que la demande initiale d'hydrogène sera faible.

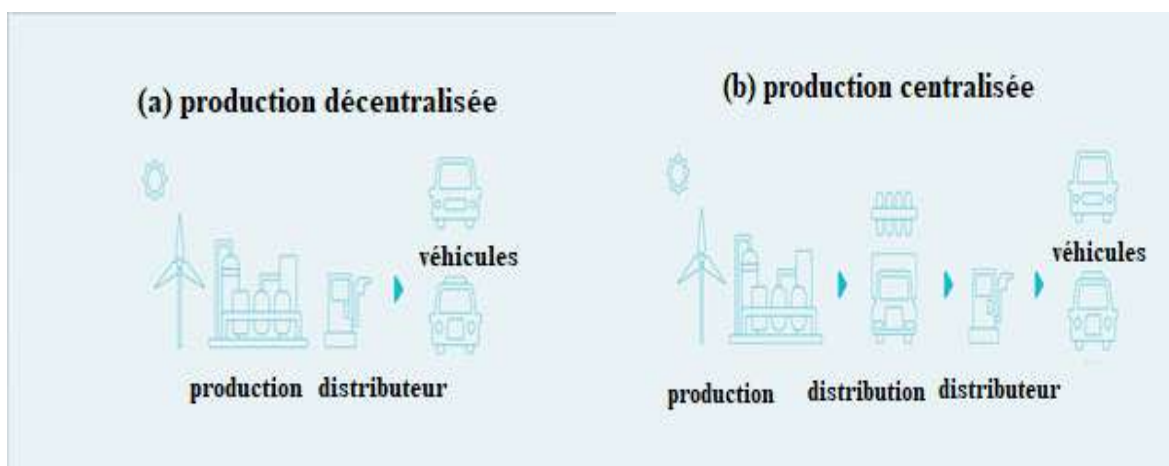


Figure III-7 : modes de production d'hydrogène : (a) production décentralisée. (b) production centralisée.

### III.7.1 Conception de station-service hydrogène

Pour introduire les stations-service, nous présentons d'abord les composants de station selon le type de production de l'hydrogène et les matières primaires. [24] :

#### III.7.1.A Station avec livraison de l'hydrogène : Type 1

Pour ces stations-service avec livraison de l'hydrogène qui est produit ailleurs et livré à la station pour le stockage local et la distribution, ce type est constitué de six éléments principaux, sans considération de la source de l'énergie :

1. Un port récepteur, permettant de recevoir l'hydrogène comprimé ou liquide d'une citerne ou d'un pipeline
2. Un système de contrôle pour gérer tous les transferts et stockage de l'hydrogène, y compris les soupapes pneumatiques, pompes, capteurs et la supervision de la sécurité de l'ensemble.
3. Échangeurs de chaleur pour chauffer l'hydrogène liquide et le transformer en gaz avant qu'il soit comprimé, et un système de distribution de liquide/gaz comprenant vannes, tuyaux, jauges et dispositifs de décompression.
4. Le compresseur ou le pulvérisateur d'air pour comprimer l'hydrogène généralement au-dessus de 350 ou 700 bar pour le stockage à haute pression.
5. Un réservoir d'hydrogène liquide (si la livraison est de l'hydrogène liquide), réservoirs de stockage d'hydrogène à basse pression (après conversion du liquide en gaz) et réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression.
6. Distributeurs prenant l'hydrogène à haute pression des réservoirs de stockage et de remplir les réservoirs d'hydrogène à haute pression intégrée dans les véhicules à hydrogène, généralement la pression est 350 ou 700-bar.

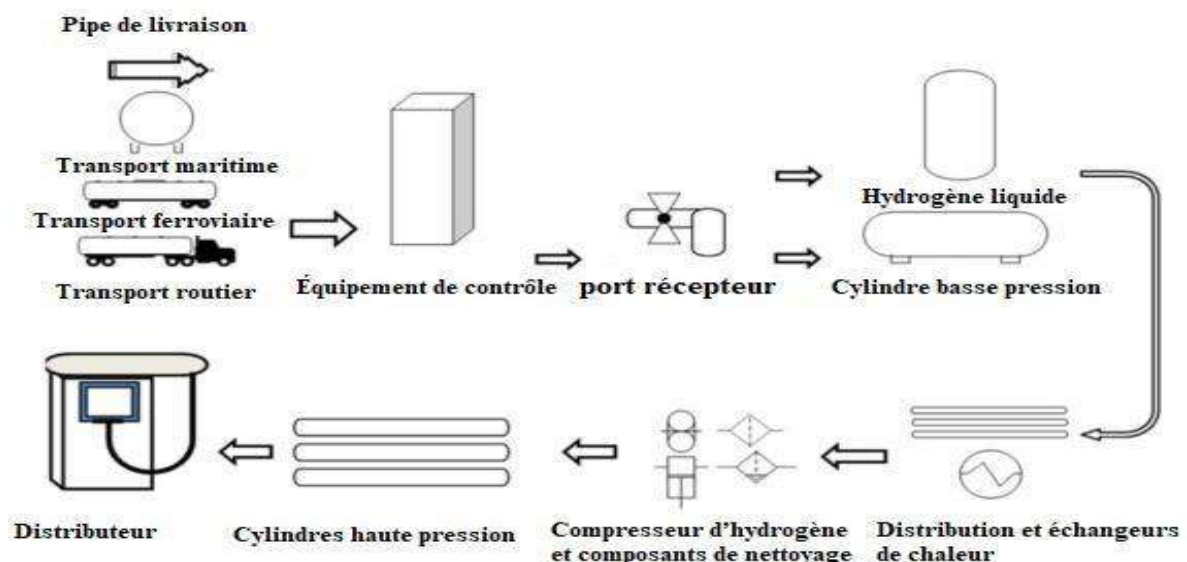


Figure III-8 : les éléments typiques d'une station-service hydrogène avec livraison de l'hydrogène. [24]

### III.7.1.B Station avec production d'hydrogène sur site : Type 2

Dans une station de production d'hydrogène sur site, un certain nombre de méthodes de production peut servir à produire de l'hydrogène à partir d'énergie disponible localement et de matières premières telles que l'eau, la biomasse ou de combustibles fossiles. Dans ce cas de figure, l'hydrogène peut être produit en utilisant toutes les méthodes de production adaptées aux sources d'énergie disponible. Certaines de ces méthodes utilisent un système d'énergie renouvelable (énergie éolienne ou l'énergie solaire) et d'autres utilisent une source d'énergie fossile. Les deux principaux modes de production d'hydrogène sur place sont utilisés l'électrolyse de l'eau et le vaporeformage du méthane.

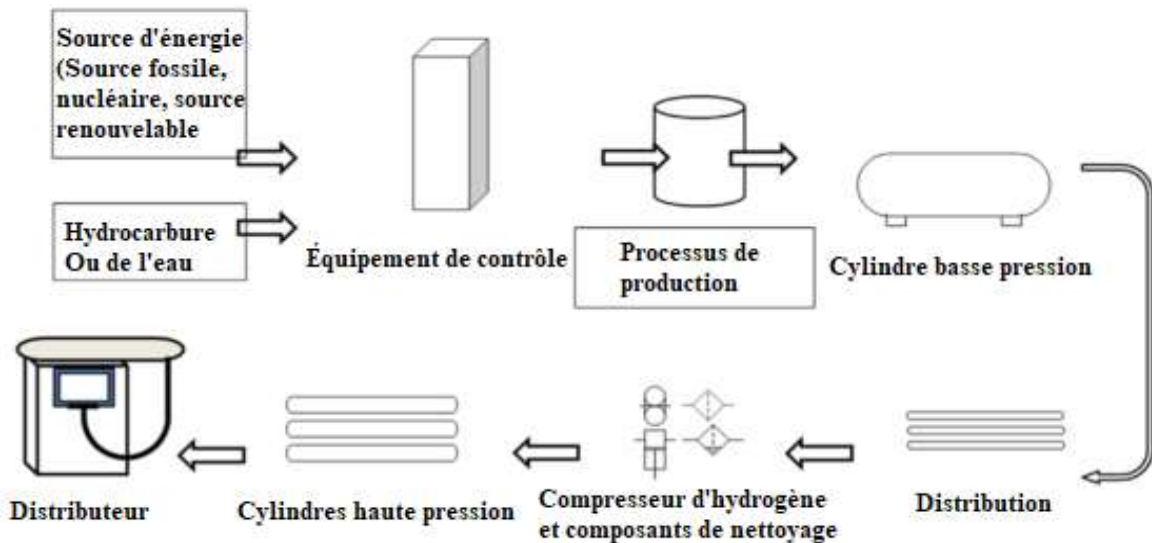
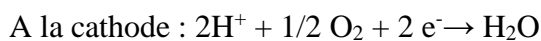
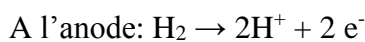


Figure III-9 : les éléments typiques d'une station-service avec production de l'hydrogène sur site. [24]

### III.7.2 Véhicules à hydrogène

L'application de l'hydrogène vert comme une énergie pour les véhicules individuels ainsi que le transport urbain (taxi, bus... etc.) est assurée par un composant appelé la pile à combustible ou PEMFC (proton exchange membrane fuel cell). Cet élément produit l'électricité à partir de l'hydrogène, comme suit ; la pile à combustible présente la particularité d'utiliser deux gaz, l'hydrogène et l'oxygène, comme couple électrochimique. Les réactions d'oxydoréduction présentes dans la pile sont donc particulièrement simples :



Il faut noter qu'il y a des différents types de pile à combustible dont nous allons mentionner brièvement, membrane échangeuse de protons (PEMFC), méthanol direct (DMFC), membrane échangeuse de protons HT (HT-PEMFC), acide phosphorique (PAFC), alcaline (AFC), carbonate fondu (MCFC), oxyde solide (SOFC). Et leurs applications sous la figure suivante.



Figure III-10 : applications des piles à combustible par types de piles. [22]

### III.7.3 Quelques applications réelles dans le monde

#### A. En Europe

Hydrogen Mobility Europe est un projet ambitieux, financé en partie dans le cadre du Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), qui consiste à démontrer que l'hydrogène peut prendre en charge les demandes de transport futures de l'Europe dans de multiples pays et, avec de multiples partenaires. Ce projet repose sur la convergence des quatre initiatives les plus ambitieuses en matière de mobilité hydrogène en Europe : H<sub>2</sub> Mobility Deutschland, Mobilité Hydrogène France, Scandinavian Hydrogène Highway Partnership et UK H<sub>2</sub> Mobility. Il rassemble les principales parties prenantes du secteur de l'hydrogène (constructeurs automobiles, fournisseurs de stations de recharge d'hydrogène et représentants gouvernementaux) pour étudier et élaborer des stratégies visant à faire du transport à hydrogène une réalité dans leurs régions. [25]

Sous H2ME, d'ici 2019, [25] ils déploieront 200 véhicules électriques, 125 fourgonnettes commerciales électriques et 29 nouvelles stations de ravitaillement en hydrogène dans 10 pays (Autriche, Belgique, Danemark, France, Allemagne, Islande, Pays-Bas, Norvège, Suède et Royaume-Uni). Les accords initiaux pour le projet ont été signés en juillet 2017 et le projet a déjà livré les premiers véhicules aux clients en France et en Allemagne (Daimler, Symbio)

#### B. Au Japon

Le gouvernement japonais considère l'hydrogène comme une énergie majeure pour l'avenir de l'automobile et envisage d'installer environ 320 stations de recharge d'hydrogène d'ici 2025, contre 90 aujourd'hui, en 2017. Le Japon a lancé la Toyota Mirai, première voiture à hydrogène à être produite de façon industrielle et même commercialisée à l'export. [26]



### C. En Chine

En 2016, en réponse à la demande des autorités, Society of Automotive Engineers of China (SAE China) a révélé un plan de route pour des économies d'énergies et des véhicules fonctionnant aux énergies alternatives, incluant un plan hydrogène. L'objectif gouvernemental est de produire 1 million de véhicules hydrogène à l'horizon 2030 et de mettre en place plus de 1000 stations à cet horizon.

### D. En Corée de sud

En Décembre 2015, le Ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Energie a révélé son troisième plan pour le développement de véhicules respectueux de l'environnement. Les fabricants de véhicules hydrogène et de stations de recharge se sont ainsi vus assigner des objectifs précis, dont 9000 véhicules et 80 stations à horizon 2020. [26]

### E. Aux Etats Unis

Le Département Américain de l'Energie (DOE) a lancé le projet H2USA, mise en place en mars 2013 sous la forme d'un partenariat public-privé regroupant les constructeurs (Fiat-Chrysler, Honda, Hyundai, GM, Mercedes, Nissan, Toyota, Volkswagen), les producteurs d'hydrogène et des organisations. La structure travaille sur le déploiement des infrastructures. [26]

En Californie, « l'Executive Order » décidé par le gouvernement en 2012 a imposé à plusieurs agences (dont le Californie Air Resources Board, la Californien Energy Commission, la Public Utilities Commission) de travailler avec les fédérations professionnelles (Plug-in Electric Véhicule Collaborative et le Californie Fuel Cell Partnership) pour atteindre trois échéances :

- A trois ans (2015) : phase de pré-commercialisation : des zones clés identifiées sont prêtes à s'équiper en véhicules plug-in et hydrogène ainsi qu'en infrastructures de recharge
- A 8 ans (2020) : phase de commercialisation : la Californie a mis en place une infrastructure capable d'alimenter un million de véhicules zéro émission
- A 13 ans (2025) : plus de 1.5 million de véhicules zéro émission circule et le marché croît rapidement.

### F. Aux Émirats Arabes Unis (EAU)

En octobre 2017, la première station d'hydrogène pour les voitures électriques à pile à combustible a été inaugurée par Al-Fotaim Motors distributeur pour Toyota aux EAU en partenariat avec Air Liquide à Dubaï. Ceci s'inscrit dans le cadre d'un programme pilote lancé en mai 2017 pour tester la technologie zéro émission sur les routes des Emirats. Les Émirats arabes unis souhaitent mettre en place, au moyen de la Vision 2021, une mobilité plus durable et propre dans le pays. Ainsi, la station est spécialement adaptée aux conditions climatiques particulières de la région et possède les dernières technologies de pointe. [27]

#### ➤ Les bus à hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène dans les transports est prometteuse car elle est déjà entrée en vigueur, la ci-dessous illustrant certains types de bus fonctionnant déjà à partir d'hydrogène.

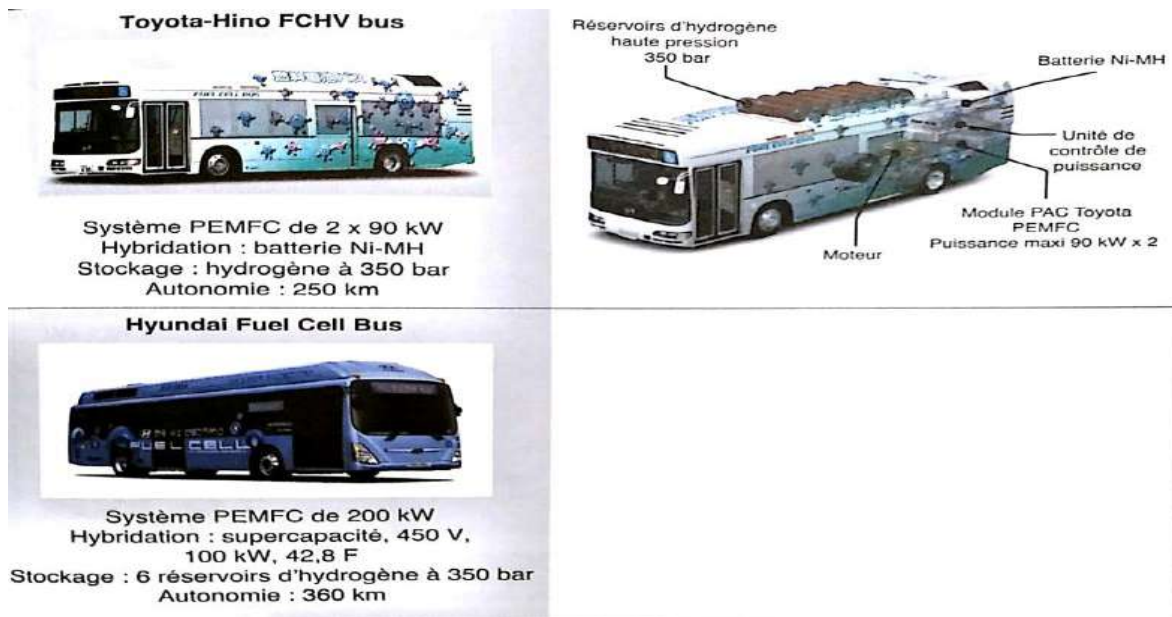


Figure III-11 : principaux modèles des bus. [22]

➤ Véhicule à hydrogène

Depuis longtemps, la voiture à hydrogène est appelée à être l'avenir de la mobilité, remplaçant le véhicule à essence et coexistant avec le véhicule électrique. Malgré cela, il semble qu'il reste encore un long chemin à parcourir avant de pouvoir rivaliser avec ces derniers. La Figure III-12 : les principaux modèles de véhicules individuels. Représente de principaux modèles des véhicules à hydrogène actuel.

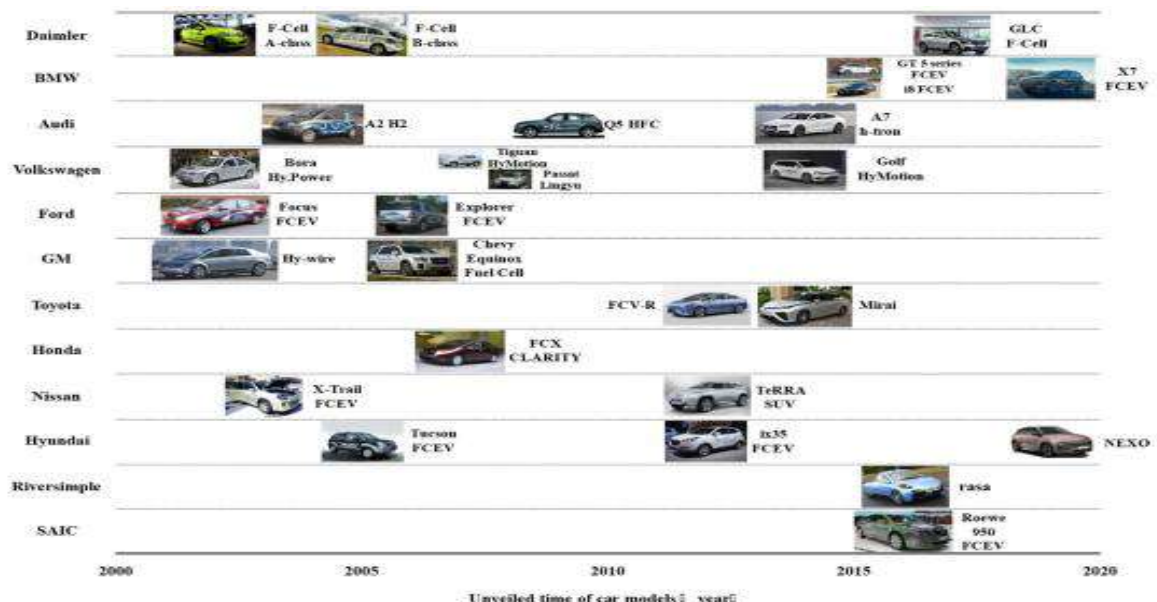


Figure III-12 : les principaux modèles de véhicules individuels.



---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

*Pour traiter la problématique de sécurité des systèmes d'hydrogène, nous avons réalisé un stage pratique au niveau de l'entreprise Linde-Gas Skikda et nous avons choisi un système qui fait l'objet de notre étude. Nous avons présenté par cette mémoire de licence professionnelle, une analyse qualitative des risques moyennant la méthode HAZOP où nous avons constaté que le risque majeur pour cette installation c'est la rupture catastrophique au niveau du ballon de stockage (selon notre étude qui a été réalisée en collaboration des experts de l'unité en question). Puis, nous avons modélisé ce phénomène par l'utilisation de logiciel de modélisation des explosions où nous avons calculé les distances d'effet thermique (jet enflammé et boule de feu) et l'effet de surpression par l'utilisation d'un logiciel de modélisation PHAST.*

*Et par conséquent, on constate que l'explosion a des effets qui peut provoquer des effets domino (affecte d'autres équipements et cause des accidents plus graves que l'accident préliminaire).*

*Comme perspectives, nous envisageons de réaliser des études quantitatives de risque pour bien quantifier le risque et de réaliser une étude des effets domino qui peut se produire à partir ces accidents préliminaires.*

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] G. BOURBONNEUX, Chapitre « Production d'hydrogène » dans « Procédés de transformation » par P. LEPRINCE, Technip, 1998.
- [2] SHERIF, S a, GOSWAMI, D Yogi, STEFANAKOS, E K (Lee) et STEINFELD, Dr Aldo, 2014. *Handbook of Hydrogen Energy*. Boca Raton London New York Handbook : Taylor & Francis Group. SBN 1420054473.
- [3] VISEUR Mathieu. *Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie*. Mémoire de master. Université Libre de Bruxelles, 2008.
- [4] S. Boucher et T. Alleau, *le transport d'hydrogène, fiche 4.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH2, 2016*
- [5] DAGDOUGUI, Hanane, 2012. *Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics : modelling , control and risk analysis*. S.l. Thèse de doctorat. L'École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [6] AMOUMENE Smail et BABA HAMOU Mohamed Nacer, *Conception de la chaîne logistique de l'hydrogène Application au réseau de transport Routier*. Mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017
- [7] ADEME, 2015. *Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations service de distribution d'hydrogène*.
- [8] H. Janssen, J. C. Bringmann, B. Emonts, V. Schroeder, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 29 (2004) 759-770
- [9] [ISO, 1999] : ISO, « Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes », Organisation internationale de normalisation, 1999.
- [10] (Kyriakdis, 2003 : Kyriakdis, I. : "HAZOP – Comprehensive Guide to HAZOP in CSIRO", CSIRO Minerals, National Safety Council of Australia, 2003
- [11] (Gouasmia, 2018) : Gouasmia Saher, Gouasmia Sara, 2018, « Evaluations de la méthode TRAM », mémoire de licence professionnelle, en Hygiène Sécurité Environnement, institut de technologie université Ouargla.
- [12] (Ben douina et kheir ; 2018) : Sara BENDOUINA, Kheira KHEIR ; 2018, « Evaluation des barrières de sécurité Application de la méthode LOPA Etude de cas : sphère de stockage GPL au niveau de Hassi R'mel », mémoire de licence professionnelle, en Hygiène Sécurité Environnement, institut de technologie université Ouargla.
- [13] (Hadeef et al, 2018) : Hadeef H., Negrou B., Ayuso T-G., Djebabra M., (2018), "Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system of hydrogen production", *International Conference on Emerging and Renewable Energy : Generation and Automation in Sousse, Tunisia*.
- [14] (Yulong, et al. 1999) : Yulong Z., Feng X., Yue Z., *The Application of HAZOP Analysis on Risk Assessment of the 10000TEU Container Ships*. 2009. *International Asia Symposium on Intelligent Interaction and Affective Computing*. P 4.

- [15] Schubert et al, 2002 : Schubert J.J., Juvkam-Wold H.C., "HAZOP of well control procedures provides assurance of the safety of the subsea mudlift drilling system." In IADC/SPE Drilling Conf. 2002.
- [16] (Kletz, 1997) : Kletz T.A., "Hazop — past and future," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 55(3), pp. 263–266, 1997.
- [17] CEI 61882 : IEC 61882. "Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide". International Electrotechnical Commission, Geneva
- [18] Site web [www.toupie.org](http://www.toupie.org), date de consultation : le 23/6/2019
- [19] GOUAREH Abderrahmane. *Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie. Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès*, 2017.
- [20] Site web : [www.liberte-algerie.com](http://www.liberte-algerie.com), date de consultation: le 23/6/2019
- [21] Site web : [www.energy.gov.dz](http://www.energy.gov.dz), date de consultation: le 4/07/2019
- [22] Edouard freund et paul lucchese, 2015. *Hydrogène, carburant de l'après - pétrole ?*
- [23] Rahmouni, S., et al. (2017). "Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria." *International Journal of Hydrogen Energy* 42(2): 1383-1395.
- [24] ALAZEMI, Jasem et ANDREWS, John, 2015. *Automotive hydrogen fuelling stations : An international review. In : Renewable and Sustainable Energy Reviews [en ligne]. 2015. Vol. 48, p. 483-499.*
- [25] H2ME, 2017. *The most ambitious hydrogen mobility initiatives in Europe have joined forces to support the introduction of hydrogen-fuelled transport,*
- [26] AFHypac, 2017. *Hydrogène : Agissons aujourd'hui pour la mobilité de demain. pp.1-5*
- [27] ENA, 2017. *Inauguration de la première station d'hydrogène aux EAU. Emirats News agency, p.1. Available at : <http://wam.ae/ar/details/1395302638518> [Accessed juin 30, 2019].*

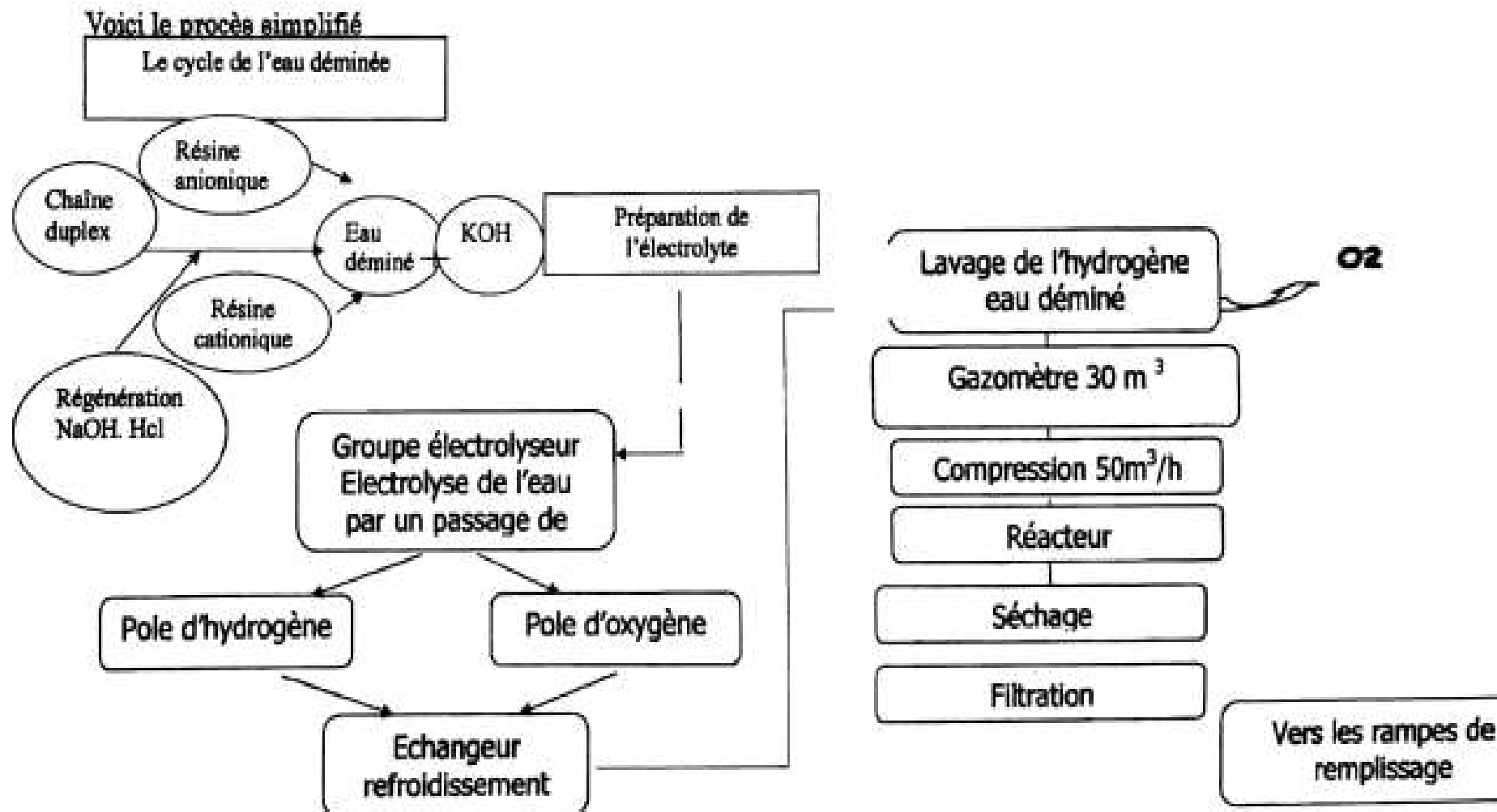


Figure III-13 : Schéma simplifier sur le processus de production d'hydrogène ; pour (Linde gas Skikda). [Annexe]

**Input Report**

Study : HYDROGEN

Tab	Group	Field	Value	Units
Material	Material	Material	HYDROGEN	
		Specify volume inventory?	Yes	
		Mass inventory	2.27485	kg
		Volume inventory	2.5	m3
		Material to track	HYDROGEN	
	Phase	Specified condition	Pressure/temperature	
		Temperature	18	degC
		Pressure (gauge)	10	bar
		Fluid state	Vapour	
		Liquid mole fraction	0	fraction
		Phase to be released	Vapour	
	Modelling of mixtures	Multi or pseudo-component modelling	PC modelling	
Scenario	Pipe dimensions	Pipe length		m
	Release location	Elevation	1.5	m
		Tank head	0	m
		Release height from vessel bottom		m
	Direction	Outdoor release direction	Horizontal	
Explosion parameters	Explosion method (Consequence calculations only)	Explosion method	Multi-Energy : Uniform confined	
	Ignition	Supply late ignition location	No ignition location	
		Location of late ignition		m

	Vapour liquid method	Use of explosion mass modification factor	Early and late explosions	
		Explosion mass modification factor	3	
Fireball	Result types to calculate	Calculate probit	Yes	
		Calculate dose	Yes	
		Calculate lethality	Yes	
	Radiation levels	Number of input radiation levels	3	
		Intensity levels	3, 5, 8	kW/m2
		Probit levels	5	
		Dose levels	6E+06, 1E+07, 1.8E+07	
		Lethality levels	0.5	fraction
	Parameters	Mass modification factor	3	
		Fireball maximum exposure duration	20	s
	Calculation method	Fireball model	Recommended	
		TNO model flame temperature	1726.85	degC
Jet fire	Jet fire method	Jet fire method	Cone model	
	Result types to calculate	Calculate probit	Yes	
		Calculate dose	Yes	
		Calculate lethality	Yes	
	Radiation levels	Number of input radiation levels	3	
		Intensity levels	3, 5, 8	kW/m2
		Probit levels	5	
		Dose levels	6E+06, 1E+07, 1.8E+07	
		Lethality levels	0.5	fraction



	Parameters	Rate modification factor	3	
		Jet fire maximum exposure duration	20	s
	Cone model data	Crosswind angle	0	deg
		Horizontal options	Use standard method	
		Correlation	Recommended	
	Surface emissive power	Calculation method for surface emissive power	Calculate SEP	
		Flame emissive power		kW/m2
		Emissivity fraction		fraction
Geometry	Geometry	East	300	m
		North	-355	m

### Catastrophic rupture

Tab	Group	Field	Value	Units
Scenario	Release location	Elevation	1.5	m
		Tank head	0	m
	Fireball emissive power	Use vessel burst pressure	No	
		Vessel burst pressure - gauge		bar
Material	Material	Material characteristics	Flammable only	
		Material to track	HYDROGEN	
	Phase	Phase to be released	Vapour	
Explosion parameters	Explosion method (Consequence calculations only)	Explosion method	Multi-Energy : Uniform confined	
	Ignition	Supply late ignition location	No ignition location	

		Location of late ignition		m
	Vapour liquid method	Use of explosion mass modification factor	Early and late explosions	
		Explosion mass modification factor	3	
Fireball	Result types to calculate	Calculate probit	Yes	
		Calculate dose	Yes	
		Calculate lethality	Yes	
	Radiation levels	Number of input radiation levels	3	
		Intensity levels	3, 5, 8	kW/m2
		Probit levels	2.73, 5, 7.5	
		Dose levels	6E+06, 1E+07, 1.8E+07	
		Lethality levels	0.01, 0.5, 0.99	fraction
	Parameters	Mass modification factor	3	
		Fireball maximum exposure duration	20	s
	Calculation method	Fireball model	Recommended	
		TNO model flame temperature	1726.85	degC

---

## RÉSUMÉ

---

*Les accidents majeurs ayant des impacts graves ne cessent de se produire malgré l'application systématique des mesures de sécurité classiques (normes de l'ingénierie, inspections, etc.). Dans ce contexte, la chaîne logistique d'hydrogène parmi les systèmes industriels le plus touché par le risque d'explosion selon les statistiques des accidents et des incidents au niveau international,*

*La problématique soulevée par ce travail s'inscrit dans ce cadre et consiste à estimer quantitativement les conséquences de l'évènement de rupture catastrophique (l'évènement le plus critique d'après l'analyse de risque HAZOP) liées à un système réel "ballon de stockage d'hydrogène H<sub>2</sub> au sein de l'entreprise Linde gas Skikda. En s'aidant d'outil performant d'analyse des conséquences "PHAST", il serait question de simuler les effets d'une explosion, pouvant survenir dans un procédé de stockage d'hydrogène "jet enflammé, boule de feu" et la surpression, et nous avons constaté que ces effets ayant des conséquences graves sur les structures et les opérateurs et peuvent se provoqué même des effets domino*

*Mots clé : stockage H<sub>2</sub>, rupture catastrophique, PHAST, analyse des risques.*

---

## ABSTRACT

---

*Major accidents with serious impacts continue to occur despite the systematic application of conventional safety measures (engineering standards, inspections, etc.). In this context, the hydrogen logistics chain among the industrial systems most affected by the risk of explosion according to statistics of accidents and incidents at the international level.*

*The problem raised by this work falls within this framework and consists in quantitatively estimating the consequences of the catastrophic rupture event (the most critical event according to HAZOP risk analysis) related to a real "balloon" system. hydrogen storage tank at Linde gas Skikda. With the help of powerful tool of analysis of the consequences "PHAST", it would be a question of simulating the effects of an explosion, which can occur in a hydrogen storage process "flash fire, fireball" and overpressure, and we have found that these effects have serious consequences on structures and operators and may even caused domino effects.*

*Keywords : H<sub>2</sub> storage, catastrophic rupture, PHAST, risk analysis.*