

RAPPORT D'ETUDE

31/01/2017

N° DRA-17-156712-00653A

**PILE À COMBUSTIBLE STATIONNAIRE :
CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF
INTERNATIONAL ET NATIONAL
RISQUES POTENTIELS**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

**PILE À COMBUSTIBLE STATIONNAIRE :
CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF INTERNATIONAL ET NATIONAL
RISQUES POTENTIELS**

**Verneuil-en-Halatte (60)
Direction des Risques Accidentels**

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Sylvaine PIQUE

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Étant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

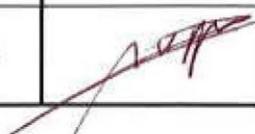
	Rédaction	Relecture	Vérification	Approbation
NOM	Sylvaine PIQUE	Souhila KRIBI	Bruno DEBRAY Frédéric MERLIER	Marie-Astrid SOENEN
Qualité	Ingénieur Direction des Risques Accidentels	Responsable du DRA-71 Direction des Risques Accidentels	Resp. Unité ERIP Délégué Appui aux pouvoirs publics Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle SUPP Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	5
1. INTRODUCTION.....	7
2. PILES À COMBUSTIBLE : QUELLES TECHNOLOGIES ? QUELS ENJEUX ?	9
2.1 Pile à combustible	9
2.1.1 Principe de fonctionnement	9
2.1.2 Les composants de la pile à combustible	10
2.1.3 Les différents types de pile à combustible	12
2.1.4 Caractéristiques et comparatif des différentes piles à combustible.....	13
2.1.5 Évolution technique des piles à combustible dans les années à venir.....	15
2.2 Système pile à combustible : les auxiliaires autour de la pile	16
2.3 Marché des piles à combustible	18
3. RETOUR D'EXPÉRIENCE : QUEL ENSEIGNEMENT ?.....	21
3.1 Données utilisées	21
3.2 Synthèse de l'accidentologie	22
3.2.1 Typologie des événements recensés.....	22
3.2.2 Circonstances des événements	22
3.2.3 Conséquences	23
3.2.4 Principaux enseignements	23
4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF	25
4.1 Contexte normatif	25
4.1.1 Normes internationales	26
4.1.2 Normes spécifiques au niveau des pays.....	27
4.2 Réglementation	30
4.2.1 Réglementation européenne.....	30
4.2.2 Réglementation française	32
4.3 Synthèse du contexte réglementaire et normatif	34
5. PRINCIPAUX RISQUES IDENTIFIÉS ET MESURES DE MAÎTRISE DES RISQUES ASSOCIÉES	35
5.1 Découpage fonctionnel des installations	35
5.1.1 Description des installations et identification des potentiels de dangers..	35
5.1.2 Potentiels de dangers liés aux substances	36
5.2 Scénarios ou situations de danger	37

5.2.1	Perte de confinement.....	38
5.2.2	Introduction d'air dans les équipements contenant des gaz inflammables.....	42
5.2.3	Mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/ air à l'intérieur du système pile à combustible.....	44
5.2.4	Emballement de réaction sur les procédés de reformage.....	45
5.2.5	Accumulation de gaz inflammables au niveau des chambres de combustion des chaudières ou réformeurs.....	46
5.3	Synthèse sur les principaux risques Identifiés et les mesures de maîtrise des risques associées.....	47
6.	CONCLUSION.....	49
7.	ANNEXES.....	51

RÉSUMÉ

Le développement de nouveaux convertisseurs d'énergie, plus efficaces et libérant moins de substances toxiques, tels que la pile à combustible, tend à s'accélérer. Leur diffusion à grande échelle suppose cependant des garanties vis-à-vis de la sécurité et l'environnement. C'est pourquoi ce rapport a pour but d'identifier ces technologies ainsi que leur potentiel de déploiement, les textes de référence, les risques et des barrières de sécurité associés afin d'aider le ministère de l'Environnement, de la Mer et Énergie à identifier les éventuels besoins réglementaires. Cette étude s'appuie sur une recherche bibliographique et une enquête terrain.

Une première partie s'attache à présenter le fonctionnement de cette technologie, les différents types de pile à combustible, les échelles de déploiement et les applications qui sont envisageables dans les années à venir. Ceci se poursuit par une présentation du retour d'expériences en synthétisant les causes, les conséquences et les mesures de maîtrise. Il est ensuite identifié le cadre réglementaire qui se base sur des directives européennes et un cadre normatif international se basant sur les normes IEC et national qui reprend notamment les standards américains, japonais et français. L'analyse des mesures de maîtrise des risques issus de ces référentiels est effectuée dans une dernière partie à travers une première évaluation des risques.

Il ressort de cette étude que :

- la pile à combustible en France fait l'objet de nombreuses recherches et de premières mises sur le marché ayant des perspectives à petite et grande échelle ;
- le cœur de la pile autant que les unités annexes (reformage, unités de combustion, alimentation en fluide...) sont à prendre en compte dans l'analyse des risques ;
- le cadre réglementaire européen s'appuie autant sur des directives économiques « énergie – climat » que des directives pour la protection des travailleurs et de l'environnement ;
- le cadre normatif est en pleine évolution et propose une démarche d'analyse des risques dès la conception ainsi que des barrières de sécurité globale à l'ensemble de l'installation : pile à combustible et installations annexes ;
- une première estimation des risques montre que l'installation est susceptible de générer des phénomènes dangereux mais qu'une analyse plus fine prenant en compte la configuration, la situation de l'installation ainsi que le type et la puissance de la pile à combustible est à mener au cas par cas.

Ces paramètres ont été identifiés comme clés pour définir une éventuelle réglementation et les seuils associés.

1. INTRODUCTION

L'hydrogène est un des vecteurs potentiels d'énergie d'avenir pour le stockage de l'électricité comme évoqué dans la loi sur la transition énergétique article 121. Il est particulièrement intéressant pour valoriser des énergies renouvelables ou pour limiter les impacts environnementaux liés au carbone. Il peut également permettre une indépendance énergétique pour des systèmes isolés, comme par exemple les bateaux ou les refuges en montagne.

Dans le contexte actuel de l'évolution du système énergétique, il est pertinent de s'appuyer sur des technologies avancées utilisant l'hydrogène, en particulier la pile à combustible (PAC) dont il est question dans ce rapport.

Le principe de la pile à combustible repose sur la production d'électricité, de chaleur et d'eau en recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. Aujourd'hui, il existe trois grands domaines dans lesquels la PAC est développée : le portable, le transport et le stationnaire. C'est dans ce dernier secteur que les PAC présentent les potentiels de développement les plus intéressants ; en effet, elles pourront toucher, dans les années à venir, des publics très divers allant des particuliers aux distributeurs d'énergie, en passant par les entreprises.

C'est ainsi que le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer soutient leur développement au travers de l'ADEME dans le fond « Démonstrateurs et plateformes technologiques en énergies renouvelables et décarbonnées et chimie verte ».

Aujourd'hui, en France, les PAC sont régies par une réglementation générale issue des directives européennes. Or, pour permettre et accompagner le développement de cette technologie, il peut être nécessaire de mettre en place une réglementation spécifique et évolutive. La première étape d'accompagnement serait d'établir un état des lieux :

- **des technologies et des systèmes pile à combustible ainsi que leur potentiel de déploiement ;**
- **des textes de référence et des processus d'autorisation associés au niveau international ;**
- **des risques et des barrières de sécurité associés.**

C'est l'objectif de l'étude, présentée ici, qui s'est appuyée à la fois sur une analyse bibliographique et sur une enquête terrain qui sont présentées en annexe 1.

Le rapport se compose de 4 parties principales :

- la première partie s'attache à présenter le fonctionnement de cette technologie, les différents types de pile à combustible, les échelles de déploiement et les applications qui sont prochainement envisageables ;
- la seconde partie porte sur le retour d'expériences en synthétisant les causes, les conséquences et les mesures de maîtrise associées à l'accidentologie ;
- la troisième partie s'intéresse aux cadres réglementaires et normatifs ;
- la dernière partie présente une analyse des mesures de maîtrise des risques issus de ces référentiels suite à une première évaluation des risques.

Diverses annexes sont présentées en fin de rapport dont un glossaire des termes et sigles utilisés.

2. PILES À COMBUSTIBLE : QUELLES TECHNOLOGIES ? QUELS ENJEUX ?

Cette partie est consacrée dans un premier temps à la présentation des différents types de piles à combustible, leur principe de fonctionnement et leurs composants.

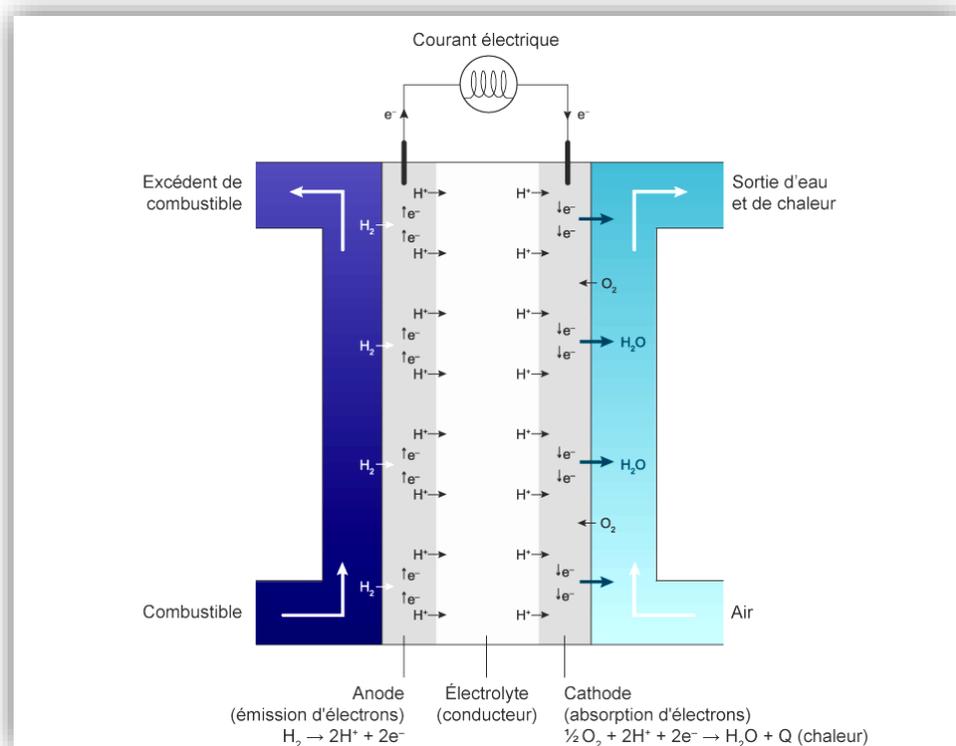
Dans une deuxième partie, nous décrirons le système PAC, c'est-à-dire les appareils auxiliaires présents autour de la pile.

Enfin nous présenterons les différents secteurs d'activités où cette technologie est utilisée ou pourrait se développer.

2.1 PILE À COMBUSTIBLE

2.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Par définition, la PAC, *Fuel Cell (FC)* en anglais, produit de l'électricité à partir d'une réaction chimique. Cette dernière est due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène ou d'air à travers une cathode. Un électrolyte, présent entre l'anode et la cathode, permet l'échange de charges électriques portées par des ions. Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge.



Figure

1 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible¹

2.1.2 LES COMPOSANTS DE LA PILE À COMBUSTIBLE

Les différents éléments, constituant le cœur de la pile à combustible, varient en fonction de la technologie. Nous développerons ces différentes technologies dans le chapitre suivant.

Mais avant cela, il est nécessaire de se familiariser avec le vocabulaire associé aux PAC. Pour cela, nous avons choisi de présenter la pile à membrane polymère (PEMFC) qui est actuellement l'une des PAC les plus commercialisées et sur laquelle s'axent, au vu de l'enquête menée, les principaux projets de développement en France.

Cellule unitaire

Chaque cellule d'une pile est constituée de plusieurs composants :

- la membrane qui permet le transport de protons et sépare le carburant de l'oxydant ;
- deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) et une cathode (collectrice d'électrons) ;
- deux couches de diffusion qui approvisionnent en gaz réactifs les électrodes ;
- deux plaques bipolaires qui alimentent en gaz et évacuent l'eau produite ;
- les joints d'étanchéité qui empêchent le carburant de l'anode et l'oxydant de la cathode de se mélanger mais également de fuir vers l'extérieur de la pile.

Ils sont présentés dans le **Figure 2** et détaillés en annexe 2.

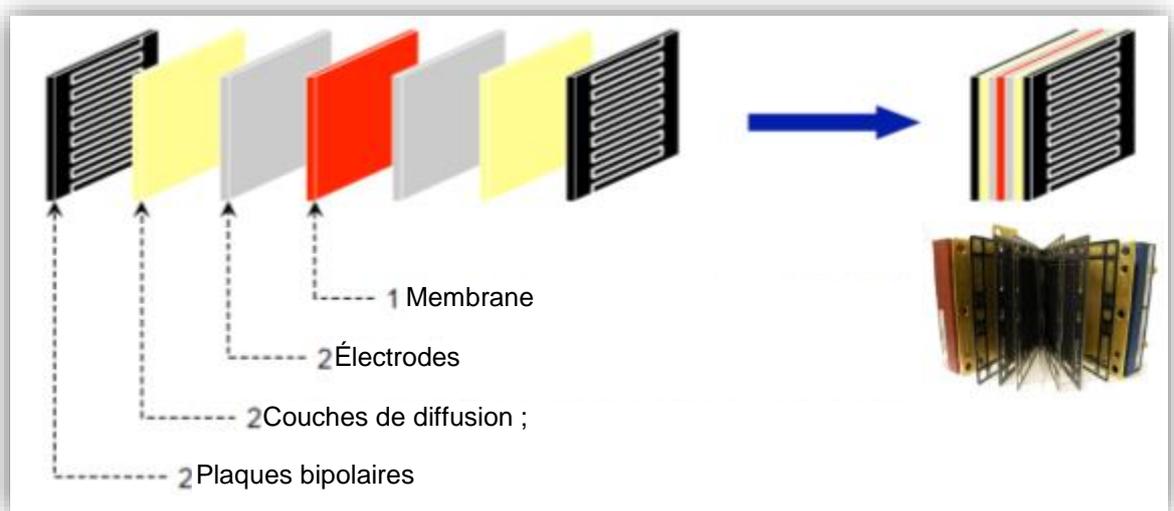


Figure 2 : Différents constituants d'une cellule²

Stack (aussi appelé *module* en français)

Une cellule unitaire fournit une tension limitée. Pour obtenir une puissance suffisante, il est indispensable d'associer plusieurs cellules unitaires en série pour créer un assemblage appelé stack. En général, toutes les cellules sont empilées et connectées électriquement en série et fluidiquement en parallèle.

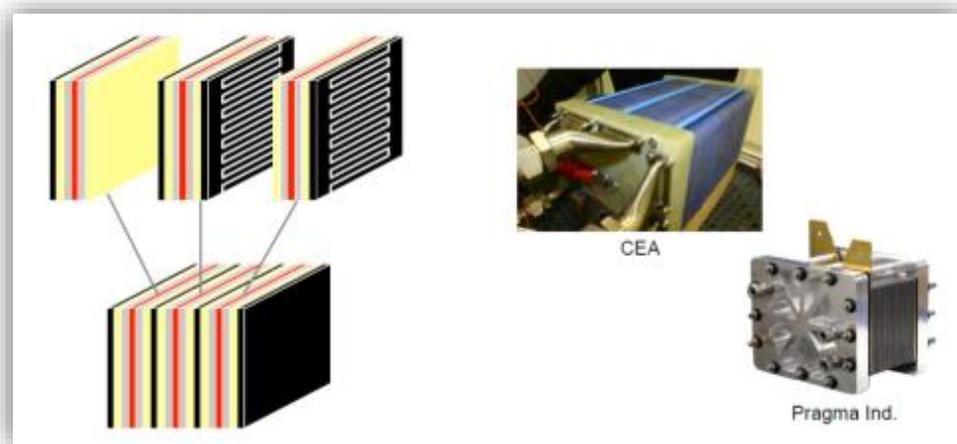


Figure 3 : Structure et exemples de stack²

2.1.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE PILE À COMBUSTIBLE

Il existe de nombreuses technologies de PAC pour l'utilisation stationnaire. Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques des types de piles à combustible les plus couramment développées et commercialisés ou sur le point au niveau international. Elles sont présentées de manière plus détaillée en annexe 3.

Modèle	Nom	Électrolyte	Température de fonctionnement	Combustibles	Puissance	Rendement électrique en%	Rendement thermique en %	Coût initial d'investissement	Durée de vie
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Polymère (solide)	50 – 100°C	H ₂	De quelques mW à 1MW	30 – 45	45 – 65	3000-4000 Dollar/kW	60 000-90 000 heures
AFC	Alkaline Fuel Cell	Potasse (liquide)	25 – 260°C	H ₂	10kW – 100kW	55 – 60	<30	200-700 Dollar/kW	5000-8000 heures
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	Acide phosphorique (liquide)	190-210 °C	H ₂	100kW – 400kW	40	40	4000-5000 Dollar/kW	30 000-60 000 heures
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	Sels fondus (liquide)	600 – 660°C	H ₂ , CH ₄ O, CH ₄	50kW – 10MW	40 – 60	40 – 50	4000-6000 Dollar/kW	20 000-30 000 heures
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	Céramique (solide)	600 – 1000°C	H ₂ , CH ₄ O, CH ₄	Jusqu'à 10MW	30 – 60	40 – 60	3000-4000 Dollar/kW	Supérieur à 90 000 heures

Tableau 1 : Caractéristiques des différents types de piles à combustible³

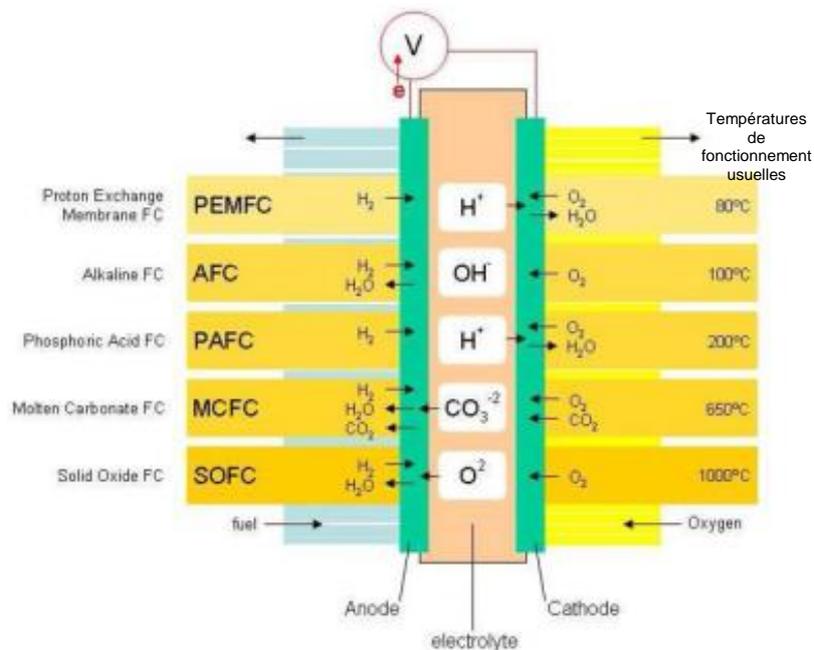


Figure 4 : Schéma de principe des différents types de piles à combustible⁴

D'autres types de piles font également l'objet de recherches comme les piles à combustible microbiennes ; mais étant au stade des études de base en laboratoire, elles ne sont pas évoquées dans ce rapport.

2.1.4 CARACTÉRISTIQUES ET COMPARATIF DES DIFFÉRENTES PILES À COMBUSTIBLE

Pour choisir un type de pile à combustible pour la cogénération, un utilisateur potentiel tiendra compte de paramètres dont les plus importants sont :

- *la température de fonctionnement* : ce choix dépend du souhait ou non de valoriser la chaleur produite et des contraintes d'environnement. On pourra choisir la MCFC ou SOFC si on veut profiter au mieux de l'énergie résiduelle. Celle-ci est contenue dans ses rejets thermiques à haute température pour alimenter un cycle thermodynamique aval ;
- *la durée de vie* : les piles « tout solide » (PEMFC et SOFC) peuvent prétendre à des durées de vie sensiblement supérieures à celles qui exigent la manipulation et le transfert d'un électrolyte liquide. La PEMFC a par exemple fait preuve d'un fonctionnement au-delà des 100 000 heures dans les conditions optimales¹⁶. La durée de vie dépend essentiellement de la pureté des combustibles pour les PEMFC et des conditions d'utilisation ;
- *l'échéance* : les diverses piles ne sont pas aujourd'hui au même stade de développement. Les plus développées et commercialisées depuis plusieurs années sont les piles PEMFS et MCFC ;
- *le coût* : on estime que le prix pourrait atteindre, d'ici 2020, 500 à 1000 €/ kW pour les applications stationnaires à durée de vie de 50 000 heures¹⁶.

D'autres considérations peuvent néanmoins guider le choix d'une pile, comme le coût du système complet, la disponibilité des matériaux tels que le platine, son intégration dans un procédé complexe, la valorisation des rejets thermiques ou encore l'acceptabilité social.

Le tableau, ci-dessous, liste les avantages et inconvénients des différentes piles à combustible en tenant compte des paramètres précédemment cités.

Type de pile	Avantages	Inconvénients
PEMFC	<ul style="list-style-type: none"> fonctionnement à basse température, donc démarrage rapide ; électrolyte solide ; excellente fiabilité ; bon comportement aux basses températures (jusqu'à -30°C). 	<ul style="list-style-type: none"> nécessite un catalyseur précieux (platine – ruthénium) ; la membrane électrolyte protonique chère et limitée en température d'utilisation (85°C) ; la sensibilité au CO (moins de 10 ppm requis).
SOFC	<ul style="list-style-type: none"> une bonne fiabilité ; des rejets thermiques à une température élevée (vers 600 – 700°C) ; pas de catalyseurs précieux ; peut utiliser des combustibles carbonés. 	<ul style="list-style-type: none"> une température de fonctionnement élevée, donc un temps de démarrage relativement long ; supporte mal les différentiels de température.
MCFC	<ul style="list-style-type: none"> bonne fiabilité ; rejets thermiques à une température élevée (vers 600°C). 	<ul style="list-style-type: none"> électrolyte liquide et corrosif (carbonates fondus) ; technologie onéreuse.
AFC	<ul style="list-style-type: none"> fonctionne dans une large gamme de température (25 à 260°C) ; performances élevées (vitesse des réactions chimiques) ; catalyseurs non précieux. 	<ul style="list-style-type: none"> électrolyte liquide et corrosif ; durée de vie courte (8000 h) ; volume important ; intolérant au CO₂ ; nécessité de traiter l'électrolyte à l'extérieur de la pile pour le purger de l'eau issue de la réaction électrochimique ; besoin d'O₂ pur ; mauvais rendement thermique.
PAFC	<ul style="list-style-type: none"> Application pour la cogénération (rendement de 85% en cogénération) ; Commercialement disponible, durée de vie longue, et retour d'expérience ; Tolère la présence de CO. 	<ul style="list-style-type: none"> ne supporte pas les arrêts (solidification de l'électrolyte). L'électrolyte s'évapore et les électrodes sont corrodées par le milieu acide de la pile. Catalyseur précieux (platine).

Tableau 2 : Liste des avantages et inconvénients des différents types de piles à combustible

2.1.5 ÉVOLUTION TECHNIQUE DES PILES À COMBUSTIBLE DANS LES ANNÉES À VENIR

Il a été choisi de présenter, dans ce paragraphe, les évolutions technologiques envisagées. L'objectif est de s'assurer qu'en cas d'évolution du contexte réglementaire, celui-ci reste cohérent avec les avancées technologiques.

Les priorités fixées, par l'agence internationale des énergies (IEA), sont d'améliorer l'efficacité des piles à combustible et les coûts des systèmes. Le Tableau 3 résume les différents axes de progrès pour chaque technologie dans les dix prochaines années pour l'application stationnaire.

Technologie	Objectifs	Délais
Pile à combustible en général	Optimiser les coûts d'investissement et d'efficacité. L'efficacité est un paramètre clé pour les applications stationnaires.	Terminé pour 2025
PEMFC	Réduire les coûts d'investissement à moins de 800 dollars par kW en réduisant le coût de la pile et les coûts associés au système. Augmenter l'efficacité du système pour atteindre au moins 50 %. Augmenter la durée de la vie à plus de 80 000 heures. Réduire la sensibilité aux impuretés de l'hydrogène et de prouver la faisabilité des capacités de la pile dans son ensemble. Atteindre l'échelle mégawatts.	Terminé pour 2025-2030
SOFC	Augmenter la durée de vie du cœur de la pile à plus de 50 000 heures. Améliorer la flexibilité opérationnelle. Réduire les coûts d'investissement à au-dessous de 2 000 dollar par kW.	Terminé pour 2025-2030

Tableau 3 : Recommandations de l'IEA quant aux axes d'amélioration des piles dans les années à venir (IEA 2015)³

2.2 SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE : LES AUXILIAIRES AUTOUR DE LA PILE

Pour produire de l'énergie, il est nécessaire d'intégrer le stack de la PAC à des équipements auxiliaires. Ils sont destinés à l'alimentation de la pile, au traitement des rejets, à la récupération ou élimination de la chaleur et à la récupération de l'électricité... Cet ensemble, PAC et auxiliaires, est appelé système pile à combustible.

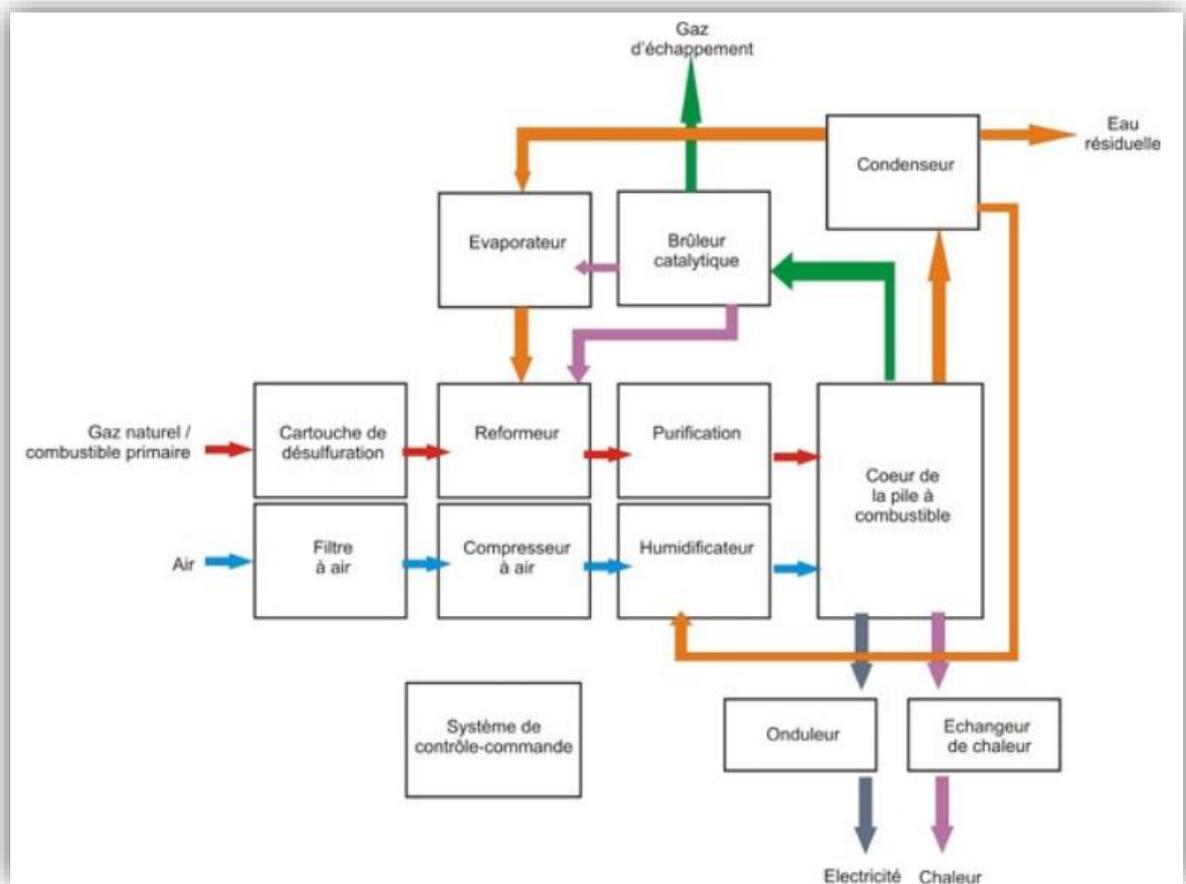


Figure 5 : Exemple d'un système pile à combustible²

Ces différents auxiliaires sont présentés de manière synthétique dans le Tableau 4 et sont détaillés en annexe 4.

Auxiliaires	Fonction
Alimentation en fluide	<ul style="list-style-type: none"> • Alimenter chaque cellule d'un stack en combustible (hydrogène, gaz naturel, kérosène ou méthanol) et oxydant (air ou oxygène) ; • Utiliser des systèmes de reformage en cas d'emploi de combustibles carbonés comme source d'hydrogène. Ces systèmes sont associés à des systèmes de purification dans le cadre de PEMFC ; • Assurer l'humidification des gaz dans le cas de PEMFC ; • Chauffer les gaz au préalable dans le cas des SOFC.
Gestion de la température	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôler la température en fonction de l'application visée ; • Évacuer la puissance thermique produite pour éviter la surchauffe des PEMFC. La chaleur est évacuée par circulation de liquide caloporteur ou injection d'air ; • Fournir la chaleur suffisante pour des systèmes hautes températures tels que le SOFC.
Traitement des rejets	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en place un système de gestion des rejets pour les gaz injectés en excès et l'eau produite par le procédé. Le rejet est soit rejeté, soit recirculé ou soit permet d'alimenter un autre équipement.
Récupération de l'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un convertisseur continu alternatif pour fournir une électricité adaptée au réseau.
Système de contrôle commande	<ul style="list-style-type: none"> • Analyser en continu l'état des différents composants du système pile à combustible par l'intermédiaire de capteurs.

Tableau 4 : Présentation des fonctions des principaux auxiliaires

Ces auxiliaires font aussi l'objet de travaux de recherche et développement. En effet, les équipements intégrés autour d'une pile à combustible sont souvent des éléments connus de l'industrie tels que des compresseurs, des convertisseurs, des échangeurs... Ils fonctionnent cependant dans des conditions différentes et doivent être adaptés à cette nouvelle technologie.

2.3 MARCHÉ DES PILES À COMBUSTIBLE

Il existe de nombreux domaines d'application associés à la pile à combustible. Ce paragraphe a pour but premier de les identifier puis de présenter leur développement actuel et futur envisagé.

Domaine d'applications associées à la pile à combustible

Il y a aujourd'hui trois grands domaines qui présentent des possibilités d'évolution dans les piles à combustible : le portable, le transport et le stationnaire avec une nette représentation de ce dernier secteur.

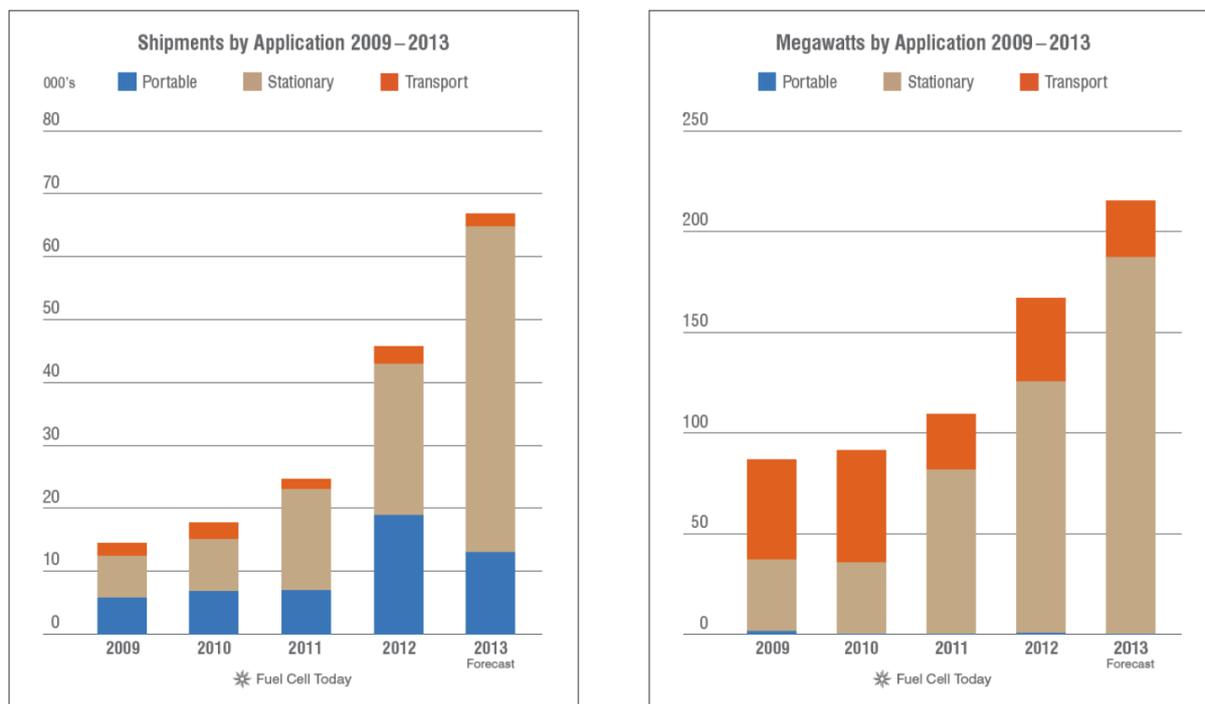


Figure 6 : Évolution de la production de piles à combustible par types d'application dans le monde (FuelCellToday 2013)⁵

Domaine stationnaire

Dans le domaine du stationnaire, les technologies de piles à combustible disponibles permettent d'envisager des applications à différentes échelles, mettant en œuvre des volumes plus ou moins importants d'hydrogène. Elles sont présentées en détail en annexe 5.

Application à grandes échelles

Des piles à combustible de grande puissance (> 50 MW) sont utilisées sur un nombre restreint de sites industriels pour la cogénération d'électricité et de chaleur en usage stationnaire. Elles permettent par exemple la valorisation de l'hydrogène produit en grande quantité par électrolyse alimenté en électricité d'origine renouvelable ou d'autres combustibles (type Hythane®, biogaz).

Nom du projet ou de l'installation	Lieu	Date	Technologie	Puissance	Source combustible
Gyeonggi Green Energy fuel cell Park	Corée	2013	MCFC	59 MWe	Énergies renouvelables (éolien, solaire, méthanisation)



Figure 7 : Exemple d'installation de forte puissance⁶

Application à petites voire moyennes échelles

Les piles à combustible peuvent être utilisées pour des applications stationnaires consommant de petites quantités d'hydrogène :

- micro et moyenne cogénération (de 1 kW à 1 MW) dans le domaine résidentiel, du tertiaire et de l'industrie, fonctionnant à partir d'hydrogène, de gaz naturel, de mélange type Hythane, de biogaz ;

Dans le domaine de la cogénération, plusieurs actions sont en cours :

- la plus importante est un programme Ene.farm qui a démarré en 2005 au Japon avec plusieurs industriels et a abouti mi – 2014 à l'installations de plus de 100 000 cogénérateurs ;
- l'Europe a démarré un programme équivalent avec Ene.field.



Figure 8 : Les deux premiers cogénérateurs Ene.field installés en 2013⁷

- applications diffuses diverses : alimentation en énergie autonome pour des installations isolées ou des systèmes d'alimentation de secours pour pallier d'éventuelles coupures électriques.

Le type de technologie dans lequel est introduit la pile à combustible est lié au secteur dans lequel il est utilisé : micro-cogénération pour les secteurs résidentiels, systèmes de moyenne cogénération pour les établissements recevant du public (hôpitaux, des écoles ou des magasins) et valorisation de l'hydrogène pour les sites industriels. Chacun de ces types d'implantation présente des enjeux de maîtrise des risques qui lui sont propres

3. RETOUR D'EXPÉRIENCE : QUEL ENSEIGNEMENT ?

Ce chapitre présente une synthèse de l'accidentologie. Cette synthèse alimente notamment l'analyse des risques.

3.1 DONNÉES UTILISÉES

L'INERIS a utilisé les données publiquement accessibles sur des bases de données et les moteurs de recherche généralistes et scientifiques tels que sciencedirect.

Base de données	Description	Sites
Hydrogen Lessons Learned	Base de données opérée par le U.S. Department of Energy	http://h2tools.org/lessons
The Hydrogen Incident and Accident Database HIAD	Base de données supportée par le Joint Research Centre Institute for Energy and Transport. Site web	https://odin.jrc.ec.europa.eu/engineering-databases.jsp
Analyse, Recherche et Information sur les Accidents ARIA	Base de données supportée par la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer	http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/recherche-r-un-accident/
Major Accident Reporting System MARS	Base de données gérée par le MAHB (Major Accident Hazards Bureau) du centre commun de recherche de la Commission Européenne centralise les informations sur les accidents majeurs survenus dans les installations industrielles des pays de l'UE et de l'OCDE	https://emars.jrc.ec.europa.eu/
Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen ZEMA	Base de données qui centralise les informations sur les accidents survenus dans les installations industrielles en Allemagne	http://www.infosis.uba.de/index.php/de/site/12981/zema/index.html
Chemical Safety Board CSB	Le CSB est une agence fédérale indépendante d'enquête post-accident chimiques pour la protection des employés, du public et de l'environnement. Les rapports d'enquêtes accident du CSB sont téléchargeables sur le site, ainsi que des vidéos	http://www.csb.gov/

Tableau 5 : Principales bases de données spécialisées en accidentologie consultées

Cette recherche a été effectuée sur la base de l'association de mots clés. Il a été choisi d'associer un mot clé décrivant l'événement redouté à un mot clé spécifiant la technologie étudiée.

Mots clés spécifiques aux événements redoutés				Mots clés spécifiques à la technologie		
Accident	Incendie	Dysfonctionnement	Défaut	Pile à combustible	SOFC	AFC
Incident	Explosion	Défaillance	Problème	PEMFC	MCFC	PAFC

Tableau 6 : Mots clés utilisés pour la recherche

Ce retour d'expérience a été complété par des données issues de l'enquête réalisée directement au près d'utilisateurs et de fabricants d'installation.

3.2 SYNTHÈSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

Il ressort de cette recherche qu'il y a peu d'accidentologie accessible publiquement, déclarée par les exploitants, sur cette nouvelle technologie. 7 événements sont recensés dans cette étude dont 5 proviennent de l'enquête.

Un tableau récapitulatif des accidents identifiés pour cette analyse des retours d'expérience est disponible en annexe 6 de ce document.

3.2.1 TYPOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS RECENSÉS

Deux événements majeurs ont été recensés sur la pile à combustible : il s'agit d'un feu et d'une fuite d'hydrogène.

Pour 5 des 7 cas recensés, le phénomène dangereux a été évité ou limité par le système de commande et de sécurité. Celui-ci met en œuvre un certain nombre de boucles de régulation ainsi que le contrôle des paramètres du système pile à combustible.

Ce système instrumenté gère à la fois la conduite et la sécurité du système. Si la pile commence à fonctionner en dehors des paramètres fixés, il arrête automatiquement la pile à combustible et les auxiliaires associées.

3.2.2 CIRCONSTANCES DES ÉVÉNEMENTS

Les incidents sont principalement dus à des causes externes à la pile et à des dysfonctionnements sur les auxiliaires à la pile.

Les principales circonstances externes de dysfonctionnements recensées sont :

- l'arrêt de l'approvisionnement en réactifs ;
- l'empoisonnement ou la contamination des alimentations de la pile ;
- la perte d'utilités ;
- le défaut d'un équipement associé.

Les incidents peuvent, dans de plus rares cas, être associés à des causes internes telles que des défauts d'assemblage ou une évolution des composants de la pile sur du long terme.

3.2.3 CONSÉQUENCES

Aucune conséquence humaine n'est recensée. Il s'agit principalement de conséquence matérielle ou économique.

Il est à noter que les arrêts d'urgence recensés peuvent générer des stress thermiques et mécaniques sur le corps de la pile qui ne sont pas présents lors d'arrêts programmés.

3.2.4 PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

L'analyse de la nature, des causes et des conséquences de ces dysfonctionnements met en évidence l'intérêt de la prévention de la formation d'atmosphère explosive et d'incendie.

Concernant les causes, les analyses des risques sont focalisées tout autant sur le cœur de la pile que les équipements auxiliaires.

Il est à noter que le système de contrôle commande est une des principales mesures de maîtrise des risques. Il doit être conçu sur la base d'une solide connaissance des paramètres du cœur de la pile. Sa fiabilisation est indispensable.

4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF

Ce chapitre présente le cadre réglementaire et normatif qui s'applique aux piles à combustible stationnaires. Nous nous sommes focalisés sur les textes applicables pour une évolution réglementaire des installations classées pour le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

4.1 CONTEXTE NORMATIF

Les normes associées aux piles à combustible sont nombreuses. Le site www.fuelcellstandards.com en recense plus de 90 relatives aux applications stationnaires publiées ou en développement. Pour faciliter leur recherche, elles sont classées selon différentes catégories sur le site (cf. Figure

1). Il est à noter que le site recense les référentiels spécifiques à d'autres domaines d'application tels que portable et le transport.

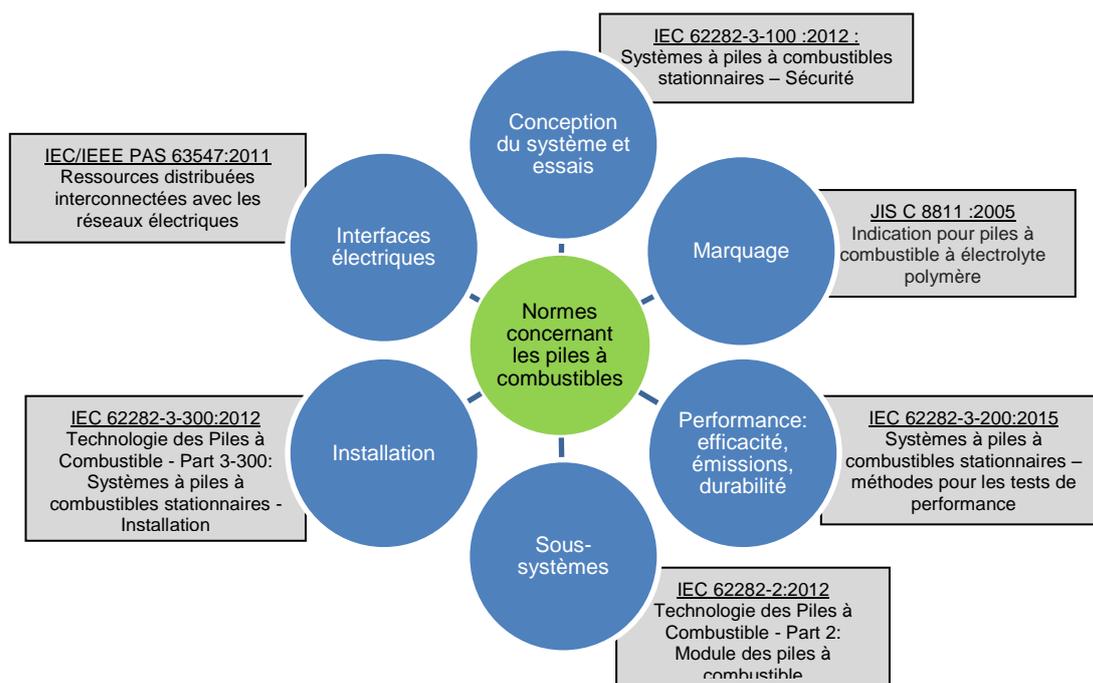


Figure 9 : Différentes catégories de normes associées aux piles à combustible

Les normes recensées ont différentes portées :

- les normes internationales IEC et ISO qui sont parfois adoptées à un niveau national ou régionales ;

Par exemple, IEC 62282-3-100 :2012 : Systèmes à piles à combustibles stationnaires – Sécurité est notamment adoptée sous les désignations suivantes :
EN 62282-3-100 :2012 au niveau européen mise en application dans les états membres sous une désignation incluant le préfixe des normes nationales comme DIN EN 62282-3-100 : VDE 0130-3-100 :2012-12 pour l'Allemagne
ANSI/CSA FC 1-2014 pour les États-Unis
CAN/CSA-C22.2 NO. 62282-3-100:15 pour le Canada

Tableau 7 : Norme IEC 62282-3-100 et quelques adoptions nationales

- les normes spécifiques à un pays.

Par exemple NFPA 853 2015 Installations de systèmes à piles à combustible stationnaires

Il a été choisi de présenter les normes spécifiques à l'évaluation de la sécurité des systèmes en détaillant d'abord les normes internationales puis les spécificités par pays lorsqu'elles apportaient un éclairage supplémentaire pertinent.

4.1.1 NORMES INTERNATIONALES

Le recours aux normes internationales joue un rôle essentiel dans l'harmonisation des réglementations et dans le développement des nouvelles technologies.

Deux comités élaborent des normes concernant les systèmes piles à combustible : ISO TC 197 et IEC TC 105.

Comité technique ISO TC 197

Un comité technique ISO1 TC 197 « **Technologies de l'Hydrogène** » a été créé en 1990 afin d'élaborer des normes dans le domaine des systèmes et dispositifs de production, de stockage, de transport, de mesurage et d'utilisation de l'hydrogène. Ce comité a édité une norme sur les spécifications du combustible pour les piles PEMFC.

Norme	Nom de la norme
ISO 14687-3 Février 2014	Carburant hydrogène - Spécification de produit - Partie 3 : applications des piles à combustible à membrane à échange de protons (PEM) pour appareils stationnaires

Comité technique IEC TC 105

Un comité technique IEC TC 105 « **Technologie des Piles à Combustible** » a été créé en 1996 afin d'élaborer des normes pour les applications mobiles et stationnaires. La France, par l'intermédiaire de l'Union Technique de l'Électricité (UTE), est membre participant de l'IEC TC 105.

Ce comité est constitué de 13 groupes de travail

WG 1	Terminologie
WG 2	Modules de piles à combustible
WG 3	Systèmes à piles à combustible stationnaires - Sécurité
WG 4	Performances des systèmes à piles à combustible
WG 5	Systèmes à piles à combustible stationnaires - Installation
WG 6	Système à pile à combustible pour la propulsion et le groupe auxiliaire de puissance (APU)
WG 7	Systèmes à piles à combustible pour des applications mobiles - Sécurité
WG 8	Micro systèmes à piles à combustible - Sécurité
WG 9	Micro systèmes à piles à combustible - Performance
WG 10	Micro systèmes à piles à combustible - Interchangeabilité
WG 11	Méthode d'essai pour des cellules unitaires pour PEMFC et SOFC
WG 12	Systèmes à piles à combustible stationnaires – Petits systèmes à pile à combustible stationnaire avec production combinée de chaleur et d'électricité

WG 13	Technologie des Piles à Combustible - Systèmes de stockage d'énergie utilisant des modules de pile à combustible en mode inversé
--------------	---

Tableau 8 : Groupes de travail de l'IEC TC 105

La sécurité des piles à combustible stationnaires est portée principalement par le groupe de travail WG 3 qui a publiée en 2012 la norme IEC 62282-3-100. Cette norme a été adoptée dans de nombreux pays et peut être utilisée pour la certification matérielle (cf. Tableau 7). Son contenu est détaillé en annexe 7, présenté dans le Tableau 9 et ses mesures de maîtrise des risques sont reprises dans le chapitre 5.

IEC 62282-3-100 :2012 : Systèmes à piles à combustible stationnaires – Sécurité	
<u>Domaine d'application</u>	
Elle s'applique aux systèmes à piles à combustible stationnaires destinées à un usage commercial, industriel ou résidentiel. Elle traite de tous les dangers importants, situations et événements dangereux relatifs aux systèmes à piles à combustible, lorsqu'ils sont utilisés comme prévu et selon les conditions prévues par le fabricant. Elle ne couvre pas la compatibilité environnementale liée aux conditions d'installation.	
<u>Structure</u>	
Cette norme est scindée en trois grandes parties qui comprennent :	
<ul style="list-style-type: none"> • les exigences de sécurité et les mesures de protection ; • les essais ; • le marquage, l'étiquetage et l'emballage 	

Tableau 9 : Présentation succincte de la norme IEC 62282-3-100

4.1.2 NORMES SPÉCIFIQUES AU NIVEAU DES PAYS

Plusieurs pays ont développé des normes spécifiques à la sécurité des piles à combustible et à ses auxiliaires associées. Nous allons nous intéresser plus spécifiquement à quatre d'entre eux : les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et la France.

États-Unis

La NFPA (National Fire protection Association) a édité en 2015 un référentiel intitulé NFPA 853 concernant les installations de systèmes à piles à combustible stationnaires. Cette norme encadre à la fois la conception, la construction et l'installation de ces systèmes. Elle s'applique à toutes les tailles de systèmes de piles à combustible. Elle traite à la fois des mesures de prévention et de protection vis-à-vis de l'incendie et des biens physiques. Son contenu est détaillé en annexe 7 et ses mesures de maîtrise des risques sont détaillés dans le chapitre 5.

Norme	Nom de la norme
NFPA 853 2015	Installations de systèmes à piles à combustible stationnaires

Japon

Le Japon après Fukushima a adopté une politique publique pour développer les systèmes de cogénération. Le gouvernement japonais a encouragé la référence aux normes industrielles japonaises (JIS) d'application volontaire. Certaines JIS référencées sont des adoptions de normes internationales IEC mais il a également édité des normes spécifiques pour concevoir les systèmes et en évaluer la sécurité. Ces derniers sont spécifiques en fonction des technologies de piles à combustible. Ils présentent à la fois sur les exigences et les tests à mettre en œuvre sur ces systèmes.

Norme	Nom de la norme
JIS C 8822 : 2008	Code général de sécurité pour les petits systèmes de piles à combustible de type PEM
JIS C 8831 : 2008	Essai d'évaluation de la sécurité pour la pile à combustible stationnaire de type PEM
JIS C 8841-2 : 2011	Petit système de SOFC Part 2 : Code général de sécurité et méthode de tests de sécurité

Allemagne

En Allemagne, l'institut allemand de normalisation est le DIN. Dans le domaine des piles à combustible, cet organisme a principalement adopté les normes éditées par l'IEC mais il a édité une norme importante concernant la cogénération : la norme DIN VDE 0126-1-1/A1. Cette norme traite du dispositif de déconnexion électrique automatique entre un système et le réseau public à basse tension.

Norme	Nom de la norme
DIN VDE V 0126-1-1 Août 2013	Dispositif de déconnexion automatique entre un générateur et le réseau public à basse tension

France

Au niveau français, la norme NF M58-003 (Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène) a été publiée en décembre 2013. Cette norme définit, sous la forme d'un guide, l'ensemble exigences de conception et d'installation à satisfaire pour assurer les conditions de sécurité requises pour les systèmes mettant en œuvre l'hydrogène. Ce document n'est pas spécifique aux piles à combustible.

Ce document vise toutes les installations faisant appel à l'hydrogène gazeux, y compris en environnement non industriel et en établissements recevant du public, à l'exception des applications suivantes :

- l'utilisation d'hydrogène dans les raffineries de pétrole et les usines chimiques comme charge d'alimentation et dans le processus de production ;
- les installations industrielles dont l'hydrogène est un sous-produit ;
- les systèmes piles à combustible utilisés dans le matériel électronique ;
- les installations en milieu résidentiel.

La Figure 10 indique les différents éléments auxquels s'applique la norme NF M 58-003 : 2013.

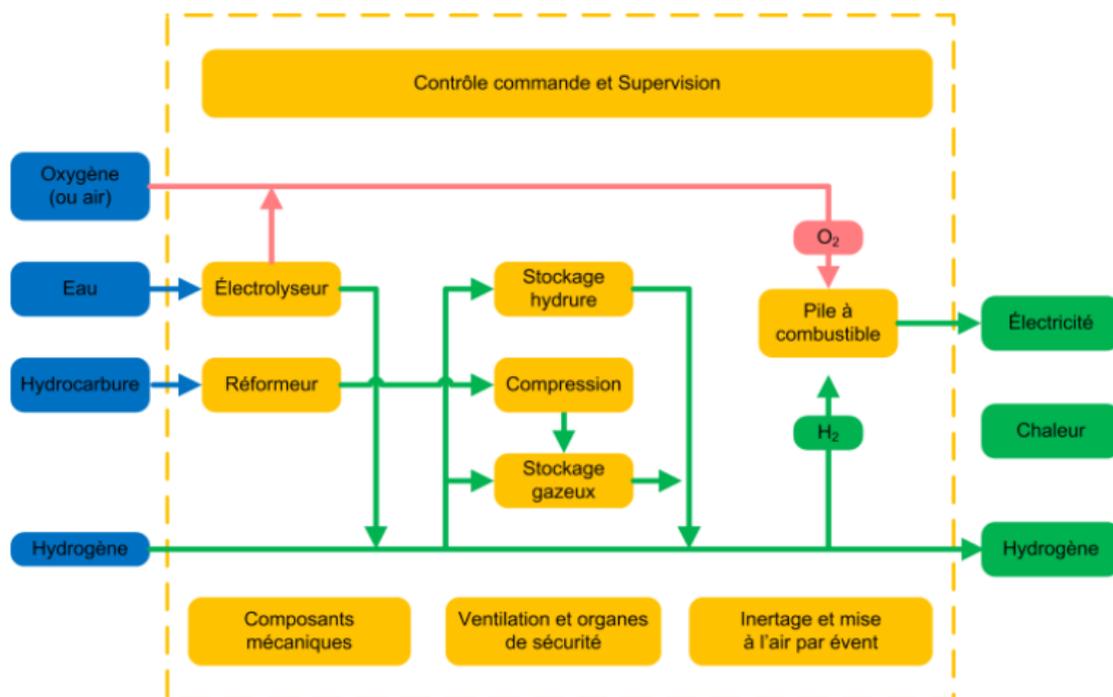


Figure 10 : Schéma d'ensemble d'un système mettant en œuvre l'hydrogène

L'annexe A de la norme NF M58-003 définit les conditions d'installation d'un système mettant en œuvre de l'hydrogène à l'intérieur d'une enceinte et définit pour différents types de fuite les mesures à mettre en œuvre (ventilation, détection, isolement).

Aucune norme française officielle n'est parue à ce jour concernant la connexion des systèmes de cogénération. C'est la raison pour laquelle c'est la norme allemande DIN VDE 0126-1-1 qui fait office de documents techniques de référence en France, pour l'instant.

4.2 RÉGLEMENTATION

4.2.1 RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

En Europe, les directives concernant les piles à combustible sont divisées en deux parties : les textes ayant des objectifs « énergie et climat » et les textes encadrant la conception et l'exploitation de ces systèmes.

Directives écologiques

Plusieurs directives ont été émises ayant pour objectifs de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, et de favoriser les ressources renouvelables et les investissements pour la maîtrise de l'énergie. Il s'agit par exemple des directives 2009/28 concernant la valorisation des énergies renouvelables ou la directive 2012/27/UE concernant l'efficacité énergétique.

Cette dernière directive s'appuie notamment sur une série de mesures : la systématisation des audits énergétiques dans les grandes entreprises, la transparence des factures et le soutien à la cogénération. Dans l'annexe 1 de cette directive, la pile à combustible est clairement identifiée comme une des technologies pour la cogénération.

Directives liées à la conception des différents systèmes

Les concepteurs et exploitants de piles à combustible doivent s'assurer du respect des exigences des directives européennes « Nouvelle approche » applicables à ces installations. Ces directives présentent des mesures génériques qui ne sont pas spécifiques aux installations mettant en œuvre de l'hydrogène.

Directive	Nom de la directive
2014/103/UE	Directive 2014/103/UE de la Commission du 21 novembre 2014 portant troisième adaptation au progrès scientifique et technique des annexes de la directive 2008/68/CE du Parlement européen et du Conseil relative au transport intérieur des marchandises dangereuses
2014/68/UE	Directive n° 2014/68/UE du 15/05/14 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression.
2014/35/UE	Directive 2014/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché du matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension.
2014/34/UE	Directive 2014/34/UE du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles.
2014/30/UE	Directive 2014/30/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique (refonte)
2012/18/UE	Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, modifiant puis abrogeant la directive 96/82/CE du Conseil.
2010/75/UE	Directive n° 2010/75/UE du 24/11/10 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution).
2010/35/UE	Directive n° 2010/35/UE du 16/06/10 relative aux équipements sous pression transportables.
2009/142/CE	Directive n° 2009/142/CE du 30/11/09 concernant les appareils à gaz
1999/92/CE	Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.

4.2.2 RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

La réglementation applicable en France dépend principalement de l'établissement où est installée la pile à combustible : habitation, établissement recevant du public ou installation classée.

Installations domestiques

La réglementation française applicable aux installations de cogénération s'appuie sur celle mise en œuvre pour les chaudières. Elle comprend un arrêté et des décrets qui sont spécifiques à l'installation, l'entretien et le contrôle.

Pour l'installation de chaudière, le texte applicable est l'arrêté du 2 août 1977 relatif aux règles techniques et de sécurité applicables aux installations de gaz combustible et d'hydrocarbures liquéfiés situés à l'intérieur des bâtiments d'habitation ou de leurs dépendances. Il a été modifié et révisé à de nombreuses reprises et est en cours de réécriture avec le Centre National d'expertise des Professionnels de l'énergie (CNPGE). Ce nouveau texte a pour objectif de fixer des dispositions relatives :

- aux matériels à gaz et à leur mise sur le marché,
- aux installations intérieures, à leur réalisation,
- aux contrôles des installations intérieures,
- à l'habilitation des organismes de contrôle (pour ce qui relève du niveau arrêté).

Il intégrera les nouvelles installations telles que les piles à combustible et s'appuiera sur des guides réglementaires rédigés par le CNPGE qui fourniront les solutions techniques permettant d'être conforme au futur arrêté.

En juin 2009, deux décrets d'application ont été émis : le décret n°2009-648 et le décret n°2009-649. Ils portent sur l'entretien des chaudières d'une part, les contrôles périodiques et les contrôles des émissions atmosphériques d'autre part. Ils ont été élaborés dans le but de vérifier le bon entretien ainsi que l'efficacité de la chaudière. Chaque décret est spécifique pour une gamme de puissance donnée : de 400 kW à 20 MW pour le décret n°2009-648 et de 4 à 400 kW pour le décret n°2009-649.

Installations dans un établissement recevant du public (ERP)

Lors de l'installation d'une pile à combustible, la vérification de la conformité d'un ERP comprend l'examen d'un dossier et des vérifications dans l'établissement. Le dossier réunit tous les documents relatifs aux dispositions prises pour assurer la sécurité, l'évacuation, l'emplacement de divers équipements à risques tels que la pile. Il fait l'objet de formulaires "Cerfa" de demande d'autorisation de construire, d'aménager ou de modifier un ERP tels que fixés par l'arrêté du 21 novembre 2011. L'ensemble de ces contrôles est assuré soit par le maire, le représentant de l'État dans le département ou la commission de sécurité selon la phase dans lequel se trouve le projet (permis de construire, travaux d'aménagement, de remplacement d'installation ou d'agrandissement ...).

Ensuite, l'ERP fait l'objet de visites périodiques de contrôles pendant l'exploitation tels que définis dans les arrêtés du 25 juin 1980.

Installations classées

Un premier listing des rubriques applicables est proposé dans le Tableau 10. Le classement dépendra des quantités d'hydrogène présentes sur l'installation, des substances mises en œuvre et des équipements présents en amont ou aval de la pile.

Installations qui peuvent être présentes sur le site	Rubriques potentiellement applicables	Désignation de la rubrique
Méthanisation pour alimenter en gaz naturel	2781	Installations de méthanisation de déchets non dangereux ou de matière végétale brute, à l'exclusion des installations de méthanisation d'eaux usées ou de boues d'épuration urbaines lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production.
Installation de cogénération couplée à une chaudière	2910	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771 et 2971.
Reformage du gaz naturel pour alimenter la pile en hydrogène	3420	Fabrication de produits chimiques inorganiques
Reformage du gaz naturel pour alimenter la pile en hydrogène (présence de monoxyde de carbone)	4310	Substances Inflammables (Gaz inflammables catégorie 1 et 2)
Alimentation en hydrogène	4715	Hydrogène (numéro CAS 133-74-0).
Alimentation en gaz naturel ou biogaz	4718	Gaz inflammables liquéfiés de catégorie 1 et 2 (y compris GPL) et gaz naturel (y compris biogaz affiné).
Alimentation en méthanol	4722	Méthanol (numéro CAS 67-56-1).
Alimentation en oxygène	4725	Oxygène (numéro CAS 7782-44-7).
Alimentation en kérosène	4734	Produits pétroliers spécifiques et carburants de substitution.

Tableau 10 : Rubriques potentiellement applicables en fonction des installations présentes

4.3 SYNTHÈSE DU CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF

Le cadre réglementaire et normatif présente actuellement :

- un ensemble abondant de normes relatives aux systèmes piles à combustible mais avec quelques normes clé concernant la sécurité ;
- une réglementation européenne qui s'harmonise auprès de directives ;
- une réglementation française qui se scinde en fonction du domaine d'application.

En effet, au niveau normatif, plus 90 normes de différents pays ont été recensées sur le site www.fuelcellstandards.com concernant les systèmes piles à combustible stationnaires mais un nombre restreint est dédié à la sécurité de ces installations. Au niveau international, une norme a été développée par le comité technique IEC TC 105 « **Technologie des Piles à Combustible** » qui est dédiée à la sécurité. Il s'agit de l'IEC 62282-3-100 :2012.

Ensuite, on retrouve des spécificités par pays avec par exemple la NFPA 853 pour les États-Unis ou les normes JIS C 8822,8831 ou 8841-2 pour le Japon. Au niveau français, la norme NF M58-003 a été publiée en décembre 2013. Cette norme se propose de définir un ensemble d'exigences de conception et d'installation à satisfaire pour assurer les conditions de sécurité requises pour des installations mettant en œuvre de l'hydrogène.

Au niveau réglementaire européen, les directives se divisent en deux catégories :

- les textes ayant des objectifs « énergie et climat » tels que la directive 2012/27/UE concernant l'efficacité énergétique qui s'appuie sur des nouvelles technologies comme la pile à combustible ;
- les textes encadrant la conception et l'exploitation de ces systèmes.

Ces derniers textes spécifiques à la conception et à la mise en œuvre des systèmes de pile à combustible ont des objectifs concernant la protection de l'environnement (exemple : SEVESO 3, IED et TMD), ou spécifiques à la sécurité des travailleurs (exemples : ATEX, Basse Tension, ESP).

Au niveau français, le contexte réglementaire se découpe en 3 niveaux en fonction de l'application : les textes spécifiques aux installations domestiques, aux établissements recevant du public ou les installations classées pour l'environnement.

Ce cadre réglementaire et normatif fait apparaître :

- un caractère évolutif avec des normes et directives qui sont en plein développement avec un nombre important de documents rédigés sur ces 5 dernières années et des documents encore en cours d'écriture ;
- des normes qui ne traitent pas uniquement des piles à combustible mais recensent également les mesures de maîtrise pour l'ensemble du système en tenant compte des auxiliaires ;
- un contexte réglementaire complexe spécifique en fonction des applications, des pays.

5. PRINCIPAUX RISQUES IDENTIFIES ET MESURES DE MAÎTRISE DES RISQUES ASSOCIÉES

Cette partie est consacrée à l'identification des principaux risques présents sur un système de pile à combustible. Cette évaluation est, par nature, générique et fournit donc une liste de scénarios ou de situations de dangers qui devra être adaptée au cas par cas pour chaque installation afin de définir de façon précise les mesures de maîtrise des risques à mettre en place.

5.1 DÉCOUPAGE FONCTIONNEL DES INSTALLATIONS

Ce chapitre a pour objectif de caractériser l'installation envisagée afin de permettre d'identifier les principaux potentiels de danger qu'elle représente, au regard notamment de la sensibilité à l'environnement.

5.1.1 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS ET IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Le système pile à combustible est présenté dans le chapitre 2.2 et l'annexe 4.

Un tel système comprend non seulement la pile à combustible elle-même mais aussi le système de traitement des combustibles, par exemple par reformage, destiné à produire de l'hydrogène à partir de combustibles hydrocarbonés tels que le méthane ou le méthanol. Ce système de traitement des combustibles contribue de façon significative aux risques du système pile à combustible, en raison de son principe de fonctionnement (réactions à haute température et haute pression) et du fait des dangers des substances qui l'alimentent. Il fait aussi l'objet de nombreuses prescriptions ou recommandations relatives à la sécurité.

Les installations prises en compte dans cette étude sont synthétisées dans la Figure 11 ci-dessous.

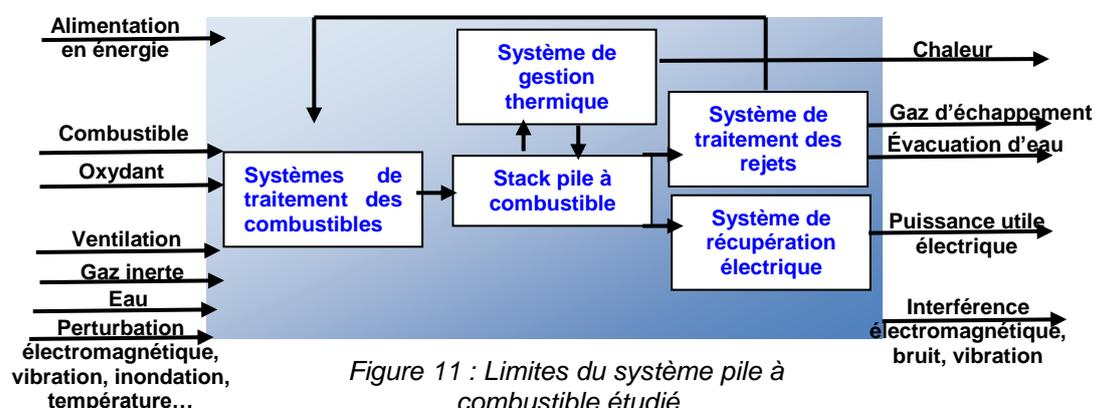


Figure 11 : Limites du système pile à combustible étudié

5.1.2 POTENTIELS DE DANGERS LIES AUX SUBSTANCES

Ce chapitre récapitule les principales propriétés physico-chimiques et les seuils des effets toxiques des substances mises en jeu dans l'exploitation du système pile à combustible. Ne sont reprises que les substances présentant un risque toxique ou inflammable.

		Gaz naturel	Hydrogène	Monoxyde de carbone	Kérosène	Méthanol
État physique		Gaz	Gaz	Gaz	Liquide	Liquide
Densité/air		0,56	0,07	0,968	≥ 5	1,11
Point éclair	°C	-	-	-	≥ 38	12
LIE (TPN)	%v/v	5	4	12,5	0,5 à 1	6,7
LSE (TPN)	%v/v	15	75	74,2	5 à 6	36,5
TAI	°C	595	585	605	-	464
EMI	mJ	0,3	0,017	-	-	-
Masse molaire	g/mol	16	2	28	-	32

Tableau 11 : Synthèse des propriétés physico chimiques des substances mis en jeu dans l'exploitation du système pile à combustible⁸

La perte de confinement de ces produits peut engendrer des phénomènes dangereux tels que les feux torches ((U)VCE) ou les feux de nappe (kérosène et méthanol) en présence d'une source d'inflammation

En fonction de la constitution des éléments du cœur de la pile à combustible, il est possible d'avoir d'autres risques tels que des risques spécifiques à la présence de nanomatériaux. Ils seront à traiter au cas par cas.

Des seuils de toxicité aiguë sont disponibles pour le monoxyde de carbone et le méthanol.

Concentration	Temps (min.)				
	10	20	30	60	120
Seuil des effets létaux significatifs – SELS · mg/m ³ · ppm	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND
Seuil des premiers effets létaux – SPEL · mg/m ³ · ppm	8050 7000	5750 5000	4830 4200	3680 3200	2645 2300
Seuil des effets irréversibles – SEI · mg/m ³ · ppm	2990 2600	2070 1800	1725 1500	920 800	460 400
Seuil des effets réversibles – SER · mg/m ³ · ppm	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND

Tableau 12 : Seuils des effets toxiques déterminés pour le monoxyde de carbone en 1998⁹

Concentration	Temps (min.)							
	1	10	20	30	60	120	240	480
Seuil des effets létaux significatifs – SELS · mg/m ³ · ppm	215 143 164 231	99 860 76 229	79 259 60 503	69 240 52 855	54 956 41 951	43 618 33 296	34 619 26 427	17 309 13 213
Seuil des premiers effets létaux – SPEL · mg/m ³ · ppm	198 044 151 179	91 924 70 171	72 960 55 695	63 737 48 654	50 588 38 617	40 152 30 650	31 868 24 327	15 934 12 163
Seuil des effets irréversibles – SEI · mg/m ³ · ppm	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND
Seuil des effets réversibles – SER · mg/m ³ · ppm	17 025 12 996	4 978 3 800	1 446 1 104	1 119 854	559 427	279 213	140 107	69 53

Tableau 13 : Seuils des effets toxiques déterminés pour le méthanol en 2006

Il existe pour le méthanol des valeurs des SEI qui sont antérieures à 2006 et qui ont été éditées en 1998.

5.2 SCENARIOS OU SITUATIONS DE DANGER

L'analyse menée conduit à retenir certains événements redoutés centraux et phénomènes dangereux constituant les scénarios dont les effets pourraient avoir des impacts sur le personnel, l'environnement voire des tiers.

Ce paragraphe a pour objectif de présenter ces scénarios de danger avec les barrières de sécurité, agissant en prévention ou en protection, provenant des référentiels IEC 62282-3-100 et NFPA-853. Ils sont présentés au travers des événements redoutés qui se dégagent. Il a été choisi de présenter ces deux référentiels en priorité car ils sont reconnus internationalement, dédiés à la sécurité et facile d'accès en terme de langue.

Dans un premier temps, les événements communs à l'ensemble de l'installation seront présentés : la perte de confinement de substances inflammables ou toxiques sur l'ensemble de l'installation ou l'introduction d'air dans les équipements contenant des gaz inflammables ; puis les événements spécifiques à certaines installations tels que les mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/ air au niveau du système pile à combustible ou l'emballément de réaction sur les procédés de reformage ou l'accumulation de gaz inflammables au niveau des chambres de combustion des chaudières ou reformeurs.

5.2.1 PERTE DE CONFINEMENT

Toutes les parties de l'installation dans lesquelles circulent des liquides ou des gaz inflammables et éventuellement toxiques sont susceptibles d'être l'objet de perte de confinement, essentiellement sous forme de fuite.

La perte de confinement peut être due :

- à la corrosion ou la fragilisation des métaux due à l'hydrogène ou à la carburation due aux gaz ou hydrocarbures présents (monoxyde de carbone, gaz naturel...) ;
- à l'usure de raccords, vannes ou joints ;
- aux défauts de régulation (refroidissement par exemple) ;
- aux défauts de mise en service et maintenance ;
- à des agressions mécaniques ou thermiques externes ;
- à des vibrations, à la fatigue et au vieillissement ;
- au choix de matériaux inadaptés (par exemple la fragilisation par l'hydrogène) ;
- aux pertes d'utilités (air, électricité...).

La corrosion ou fragilisation ou attaque des métaux et les défauts de montage sont une des principales causes de perte de confinement sur les installations contenant de l'hydrogène.

Les fuites sont facilitées par la taille de la molécule d'hydrogène. La corrosion et la fragilisation sont aussi liées aux propriétés de perméation de l'hydrogène dans certains matériaux et la réaction avec ceux-ci conduit à leur fragilisation.

Les principaux phénomènes dangereux associés à une perte de confinement sont :

- l'explosion d'un nuage de gaz inflammable (VCE ou UVCE en fonction de l'implantation de la pile dans un milieu confiné ou non) ;
- le jet enflammé de gaz inflammables (effets thermiques) ;
- le feu de nappe de liquides inflammables (kérosène ou méthanol) ;
- la suroxygénation ou le feu, consécutif à un rejet d'oxygène si présence d'oxygène pur ;
- le rejet de produits toxiques tels que le monoxyde de carbone ou méthanol si présence de combustibles carbonés ;
- l'anoxie consécutive à un rejet d'argon / azote si présence de gaz inertant.

Barrières de prévention

Installation(s) concernée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Ensemble de l'installation	Protéger de la corrosion ou fragilisation ou autres attaques chimiques et éviter le choix de matériaux inadaptés	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.3 Paragraphe 5.5	Choix à la conception ou protection adaptée (matériaux de parement ou revêtement par exemple) Remplacement des pièces affectées et mesures d'inspection et maintenance Essais de résistance des composants (essais de résistance pneumatique, essais de résistance hydrostatique)
	Prévenir l'accumulation de condensat ou de dépôt à l'intérieur des tuyauteries de liquides ou gaz inflammables	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.5	Mise en place de moyens de drainage et d'élimination des dépôts des pièces basses ainsi que des moyens d'accès pour le nettoyage, l'inspection et la maintenance
	Prévenir les agressions thermiques (effets dominos)	NFPA 853 Paragraphe 5.1	Maintenir une distance de 1,5 m entre le système pile à combustible et les matières inflammables, les produits chimiques, les stockages de grandes hauteurs... Choisir les lieux tels qu'un incendie ou défaut sur des équipements ne présentent pas de risque sur le système pile à combustible adjacent
	Prévenir les agressions extérieures	NFPA 853 Paragraphe 5.1	Choisir le lieu et protéger des dommages matériels
	Identifier les fuites potentielles avant la mise en service et les limiter par un système de ventilation adéquat	IEC 62282-3-100 Paragraphe 5.4 5.13, 5.20 et 5.21	Essais de types à la conception (essais de fuites pneumatiques et hydrostatiques, essais sur le système de ventilation...)
Reformage de combustibles carbonés liquides	Capturer, recycler ou éliminer sans risque des liquides inflammables (issus d'une éventuelle perte de confinement)	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.5	Dispositions constructives pour éviter les déversements accidentels (bacs d'égouttements, protections contre les déversements ou des tuyauteries à doubles parois)

Barrières de protection

Installation(s) concernée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Ensemble de l'installation	Limiter ou diluer les fuites de substances inflammables (durée ou débit de fuite)	NFPA 853 Paragraphe 7.1	Prévoir un système de ventilation et d'échappement si espace confiné. Si c'est une ventilation mécanique, prévoir un asservissement pour arrêter le système pile à combustible en l'absence de ventilation.
Systèmes à piles à combustible munis de boîtiers		IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.6	Dispositifs pour diluer les dégagements internes en dessous de 25 % de la LIE si espace confiné (oxydation contrôlée ou ventilation mécanique)
Systèmes à piles à combustible ou système d'échappement ou compressions situés en intérieur ou en cas de dépotage d'H₂		NFPA 853 Paragraphe 8.1	Dispositifs de détection gaz ou liquide inflammables (positionnés selon les sources de fuites, spécifiques aux substances inflammables présentes, déclenchement d'une alarme à l'atteinte de 25% de la LIE et asservissement à l'arrêt de l'alimentation électrique et combustible à l'atteinte de 60% de la LIE)
Alimentation en gaz naturel		NFPA 853 Paragraphe 6.4	Prévoir 2 vannes manuelles sur l'alimentation en hydrogène situées à 1,8 m du stockage et de l'alimentation électrique du système
Systèmes à piles à combustible munis de boîtiers	Empêcher l'inflammation de gaz ou vapeurs inflammables	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.6	Dispositifs pour éliminer les sources d'allumage (adéquation du matériel, limiter les températures de surfaces à 80% de la TAI, mise à la terre des équipements, maintien des compartiments contenant des équipements électriques à une pression positive...)
Système à combustible/ Équipements électriques		IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Dispositifs constructifs pour éviter les surcharges dangereuses (interrupteurs de surintensité, des limiteurs de température, des pressostats différentiels, des débitmètres, des relais temporisés ou des dispositifs de surveillance similaires)
		IEC 62282-3-100 Paragraphe 5.5	Essais de surcharge électriques
		NFPA 853 Paragraphe 5.1 et 8.1	Dispositifs pour séparer le système électrique des composants du système pile à combustible et des systèmes de ventilation associés (porte, fenêtre, conduit d'air...) Possibilité d'installer un transformateur de type sec dans un compartiment contenant des substances inflammables

Installation(s) concernée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Systèmes à piles à combustible situés en intérieur	limiter les effets en dehors de l'installation	NFPA 853 Paragraphe 5.3 et 8.1	Dispositifs de séparation de la pile du reste des installations par des murs coupe-feu et des assemblages horizontaux ayant au minimum une résistance au feu d'une heure. Protéger les ouvertures entre les pièces avoisinantes et les espaces occupés par des portes ou clapets coupe-feu. Dispositifs de détection incendie automatique, alarmes et asservissement de l'alimentation en substances inflammables
Ensemble de l'installation		NFPA 853 Paragraphe 8.2	Prévoir un plan de gestion des situations d'urgence
Reformage de combustibles carbonés liquides	Prévenir la pollution en limitant les rejets de substances toxiques tels que le méthanol à l'extérieur du site	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.4	Mise en place de moyens de rétention d'une capacité de 110% du volume du liquide
Reformage de combustibles carbonés liquides	Évacuer la surpression générée	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Soupape de sécurité pour tout équipement ou système pour lequel le blocage ou la rétention de débit liquide est nécessaire
Compresseurs, pompes	Évacuer la surpression générée	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Détendeurs de pression, dispositif de décharge, commande d'arrêt automatique

5.2.2 INTRODUCTION D'AIR DANS LES ÉQUIPEMENTS CONTENANT DES GAZ INFLAMMABLES

Les principales causes d'infiltration d'air dans les équipements contenant des gaz inflammables sont :

- la présence d'air dans des volumes remplis de gaz inflammables après une opération de maintenance ou l'oubli d'inertage lors du démarrage de l'installation ;
- l'infiltration d'air à l'aspiration du compresseur par défaut d'alimentation en gaz.

L'alimentation des compresseurs est une phase critique qui présente des risques d'infiltration d'air extérieur dans le cas où l'alimentation en hydrogène est bloquée par une vanne en position fermée par exemple. En effet, si un compresseur fonctionne sans alimentation, un vide se crée et de l'air peut s'infiltrer à l'intérieur.

Le phénomène dangereux potentiellement envisageable est l'éclatement du compresseur ou d'un équipement de l'installation auxquels sont associés des effets de pression et de projection.

Barrières de prévention

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Ensemble de l'installation	Empêcher le mélange d'air et de gaz inflammables	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.2	Mise en place de moyens de purge pour mettre l'installation dans un état passif après l'arrêt ou avant la mise en marche
Équipements sous pression		NFPA 853 Paragraphe 7.4	Dispositif de purge pour les équipements et tuyauteries sous pression et évacué en dehors du bâtiment à au moins 4,6 m d'une arrivée d'air, fenêtre, porte ou ouverture d'un autre bâtiment.
Ensemble de l'installation		IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.15	Dispositifs pour éviter le retour de gaz inflammables dans la source du combustible
Installation alimentée en gaz naturel		NFPA 853 Paragraphe 6.2	Quand du gaz naturel sans odeur est utilisé, prévoir un dispositif pour éviter le retour de gaz dans d'autres bâtiments ou tuyauteries
Ensemble de l'installation		IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.15	Prévenir les erreurs de montage lors d'opérations de maintenance Dispositifs pour déconnecter le générateur de pile à combustible des alimentations en courant. Dispositif de verrouillage physique du système afin d'éviter toute reconnexion involontaire avant la fin de l'entretien

Barrières de protection

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Ensemble de l'installation	limiter les effets en dehors du système piles à combustible	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.6	Dispositifs pour que la quantité maximale de mélange inflammable qui peut s'accumuler, si la combustion a lieu, produise des pressions et des températures pouvant être contenues dans les composants exposés à de telles conditions

5.2.3 MÉLANGES D'HYDROGÈNE/OXYGÈNE OU HYDROGÈNE/ AIR À L'INTÉRIEUR DU SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE

Les mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/air peuvent avoir lieu à l'intérieur du cœur de la pile à combustible ou sur les équipements en aval tel que les systèmes de condensation pour séparer l'hydrogène de l'eau et récupérer l'hydrogène pur.

Ces défauts apparaissent d'abord au niveau du stack et ont souvent un lien direct avec la gestion des auxiliaires en amont.

Ils peuvent être dus à :

- un défaut d'approvisionnement en gaz ;
- un gradient de pression entre l'anode et la cathode ;
- une température trop élevée de la pile ou une diminution de la teneur en eau qui provoque un assèchement de la membrane ;
- l'attaque directe du polymère de la membrane par des espèces radicales (hydroxyle OH ou des radicaux hydroperoxyl OOH ou peroxyde d'hydrogène H₂O₂) qui se forment pendant le fonctionnement du stack ;
- la pollution par des espèces étrangères ;
- un défaut dans les dispositifs de conditionnement de l'énergie électrique (convertisseur de courant, batterie en aval...) ;
- des courts circuits ;
- la fatigue et le vieillissement voire un défaut d'installation ou de conception.

Le phénomène dangereux envisageable spécifique à la pile à combustible est l'explosion du mélange conduisant à l'éclatement de la pile ou d'un équipement en aval auxquels sont associés des effets de pression et de projection.

Barrières de prévention

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Pile à combustible	Empêcher toute défaillance d'un composant pouvant conduire à une situation dangereuse	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Dispositifs pour éviter toutes défaillances en chaîne (verrouillage de protection du circuit électrique, des dispositifs de déclenchement, des essais fonctionnels, des redondances ou de la diversité partielle ou complète des composants, choix de composants éprouvés...)
	Empêcher les défauts d'approvisionnement en eau	EC 62282-3-100 Paragraphe 4.15	Source d'alimentation en eau sur place qui doit permettre l'apport en quantité suffisante pour le fonctionnement
Installation de biogaz couplée à la pile	Empêcher la pollution par des espèces étrangères	NFPA 853 Paragraphe 6.5	Prévoir des dispositifs additionnels de décontamination associés à des alimentations en combustible issues du biogaz

Barrières de protection

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Pile à combustible	Empêcher le fonctionnement en cas de défaut d'approvisionnement du combustible ou oxydant	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Arrêt de l'alimentation en combustible en cas de déclenchement d'un limiteur, d'un disjoncteur ou à la détection d'une défaillance interne du système. Le système revient en position de départ.

5.2.4 EMBALLEMENT DE RÉACTION SUR LES PROCÉDÉS DE REFORMAGE

Dans les procédés de reformage, les températures et pressions sont relativement élevées (températures de 400°C à plus de 900°C et pression de 20 à 30 bar).

Ces procédés présentent des risques d'emballement dans le cas de :

- dysfonctionnement du système de refroidissement ou de régulation de pression ;
- dégradation ou empoisonnement des catalyseurs par le sulfure contenu dans le gaz naturel par exemple ;
- des défauts d'approvisionnement en eau ou monoxyde de carbone qui peuvent entraîner des réactions non désirées.

Le phénomène dangereux potentiellement envisageable spécifique à l'unité de reformage est l'explosion du mélange conduisant l'éclatement du réacteur auxquels sont associés des effets de pression et de projection.

Barrières de prévention

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Reformage de combustibles carbonés	Empêcher l'accumulation des produits de combustion à l'intérieur de l'équipement	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.5	Mise en place d'un système d'évacuation des fumées.
	Empêcher la dégradation du catalyseur	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.5	Arrêt de l'alimentation en combustibles ou réactifs à l'atteinte d'un seuil de température du catalyseur
	Empêcher les défaillances dangereuses	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.9	Dispositifs constructifs pour éviter les défaillances dangereuses (des limiteurs de températures, des pressostats différentiels, des débitmètres, des relais temporisés, des limiteurs d'emballements ou des dispositifs de surveillance similaires)

5.2.5 ACCUMULATION DE GAZ INFLAMMABLES AU NIVEAU DES CHAMBRES DE COMBUSTION DES CHAUDIÈRES OU RÉFORMEURS

L'accumulation de gaz inflammables peut être due à l'excès ou le défaut de comburant ou combustible ou l'absence de combustion suite à un défaut de flamme ou un allumage retardé.

Les principaux phénomènes dangereux associés sont

- l'explosion d'un nuage de gaz inflammable provoquant l'éclatement de la chambre de combustion ;
- l'éclatement du ballon d'eau chaude.

Barrières de prévention

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Équipements munis d'un brûleur	Empêcher le mélange d'air et de gaz inflammables	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.6	Mise en place de moyens de purge pour mettre l'installation dans un état passif après l'arrêt ou avant la mise en marche. La purge doit apporter un minimum de 4 changements d'air dans la chambre de combustion.
		IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.15	Dispositifs pour éviter que l'air ne retourne dans la tuyauterie de combustible et inversement
		IEC 62282-3-100 Paragraphe 5.9 et 5.10	Essais de caractéristiques de fonctionnement et de commande automatique du brûleur (modes opératoires à exécuter au démarrage et arrêt, essais du système automatique de commande de sécurité pour le démarrage et l'arrêt, essai de pression d'alimentation en combustible minimale et maximale, essais d'allumage, essais de température des composants...)

Barrières de protection

Installation(s) impactée(s)	Fonction de sécurité	Exemples de mesures de maîtrise des risques	
		Norme	Exemple
Équipements munis d'un brûleur	Empêcher l'inflammation de gaz inflammables	IEC 62282-3-100 Paragraphe 4.6	Dispositifs constructifs autour du brûleur (veilleuse, appareil d'allumage direct, contrôle de flamme ou d'oxydation, dispositif de verrouillage en l'absence d'allumage...)

5.3 SYNTHÈSE SUR LES PRINCIPAUX RISQUES IDENTIFIÉS ET LES MESURES DE MAÎTRISE DES RISQUES ASSOCIÉES

Cette partie synthétise les principaux risques identifiés et les barrières associées à un système de pile à combustible sur la base de des référentiels IEC 62282-3-100 et NFPA 853. Cette évaluation est générique et est à adapter en prenant des critères comme la taille des systèmes ou les pressions mises en œuvre ou la situation de l'installation (intérieur ou extérieur) ou les produits mis en œuvre.

Les situations à risque sont autant liées aux produits mis en œuvre (hydrogène, monoxyde de carbone, méthanol...), aux conditions opératoires (températures, humidité, pressions...), à la sensibilité de certains composants (par exemple l'influence des corps étrangers sur la dégradation de la membrane pour les piles PEMFC) et les conditions de l'environnement de l'installation (espace confiné ou aéré, présence de tiers autour...).

Les causes de défaillances concernent non seulement la pile en elle-même que les éléments annexes (unité de réformage, stockage, régénération de l'hydrogène...). Par exemple les utilités (électricité, alimentation en fluides, en gaz inertes, de fluides thermiques, d'eau...) ont une incidence sur le fonctionnement de la pile. En effet, l'une des principales causes de survenue d'un scénario dangereux est la défaillance ou la rupture d'une utilité.

Ces facteurs sont à surveiller car ils peuvent mener aux événements redoutés et phénomènes dangereux suivants :

Événements redoutés	Installations impactées	Phénomènes dangereux associés
Perte de confinement de substances inflammables ou toxiques sur l'ensemble de l'installation	Ensemble de l'installation	Explosion d'un nuage de gaz inflammable (VCE ou UVCE) ; Jet enflammé de gaz inflammables (effets thermiques) ; Feu de nappe de liquides inflammables (kérosène ou méthanol) ; Suroxygénation ou le feu, consécutif à un rejet d'oxygène si présence d'oxygène pur ; Rejet de produits toxiques tels que le monoxyde de carbone ou méthanol si présence de combustibles carbonés ; Anoxie consécutive à un rejet d'argon / azote si présence de gaz inertant.
Introduction d'air dans les équipements contenant des gaz inflammables	Ensemble de l'installation	Éclatement du compresseur ou d'un équipement de l'installation
Mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/ air au niveau du système pile à combustible	Pile à combustible ou équipement en aval	Explosion du mélange conduisant à l'éclatement de la pile ou d'un équipement en aval
Emballement de réaction sur les procédés de reformage	Réservoir ou cuve du procédé de reformage	Explosion du mélange conduisant l'éclatement du réacteur
Accumulation de gaz inflammables au niveau des chambres de combustion des chaudières ou reformeurs	Chaudières ou reformeurs	Explosion d'un nuage de gaz inflammable provoquant l'éclatement de la chambre de combustion ; Éclatement du ballon d'eau chaude.

Tableau 14 : Synthèse des événements redoutés et phénomènes dangereux associés aux piles à combustible

Afin d'éviter ces phénomènes, des mesures de maîtrise et même une gestion globale de la sécurité ont été identifiés au travers des référentiels IEC 62282-3-100 et NFPA 853.

La norme IEC 62282-3-100 propose un programme de management de la sécurité qui prend en compte toutes les phases de vie du système pile à combustible. Elle propose notamment d'effectuer les actions suivantes : analyse de risques à la conception, identification des mesures de maîtrise de prévention et de protection, qualification des équipements, essais, formations des utilisateurs, marquage de l'équipement...

En plus de cette démarche globale, les référentiels font ressortir des barrières de sécurité essentielles pour permettre le développement de cette technologie telles :

- des mesures liées à la configuration des sites tels que la ségrégation des risques (par exemple séparation des substances inflammables et sources d'inflammation par la mise place d'une pression positive sur les compartiments électriques) ou la protection incendie par des systèmes de type « coupe-feu » ;
- des systèmes instrumentés de sécurité qui permettent de mettre en sécurité le système pile à combustible en cas de défaillances (hausse de température, variation de pression, détection gaz inflammables...). Les normes insistent sur la fiabilité de ces systèmes notamment dans le cas de systèmes autonomes ;
- des mesures de ventilation, de drainage et de purge pour éviter la formation d'atmosphère explosives.

Pour rappel, l'annexe A de la norme française NF M58-003 définit les conditions d'installation d'un système mettant en œuvre de l'hydrogène à l'intérieur d'une enceinte et définit pour différents types de fuite les mesures à mettre en œuvre (ventilation, détection, isolement).

Ils mettent l'accent sur la maîtrise des différentes phases de fonctionnement du système pile à combustible : mise en service, démarrage, arrêt...

6. CONCLUSION

Aujourd'hui, en France, les PAC sont régies par une réglementation générale issue des directives européennes. Or, pour permettre et accompagner le développement de cette technologie, il peut être pertinent de mettre en place une réglementation spécifique et évolutive. La première étape dans la poursuite de cet objectif est d'établir un état des lieux :

- **des technologies et des systèmes pile à combustible ainsi que leur potentiel de déploiement ;**
- **des textes de référence et des processus d'autorisation associés au niveau international ;**
- **des risques et des barrières de sécurité associés.**

Nous retiendrons tout d'abord de cette étude que la pile à combustible est une technologie qui en France fait l'objet de nombreuses recherches et de premières mises sur le marché. Sur les nombreux procédés présents à l'international, deux types de piles ressortent, dans l'hexagone : une pile basse température : PEMFC et une pile haute température : SOFC. Les avancées sur ces deux technologies s'axent autant sur l'optimisation des performances du cœur de la pile que de ses unités annexes, l'ensemble constituant le système pile à combustible. Ses évolutions permettent d'envisager des applications à différentes échelles : de la micro-cogénération avec des puissances de l'ordre du kilo watt à des installations de grande dimension avec des puissances pouvant dépasser les 50 MW. La diversité de ces applications se traduit par une grande diversité des sites potentiellement intéressés par leur développement et concernés par la maîtrise des risques associés : les secteurs résidentiels, les établissements recevant du public et les sites industriels.

Il est à noter que les coûts actuels des piles à combustible ne sont pas compétitifs par rapport à d'autres systèmes de cogénération, mais des développements sont en cours pour optimiser ses constituants ainsi que ces performances...

Face à cette progression, il ne faut pas oublier que le système pile à combustible met en œuvre des substances inflammables et un comburant et, dans certains cas, des toxiques. Le retour d'expérience fait apparaître l'importance de maîtriser les risques tant au niveau du corps de la pile que des équipements auxiliaires. Il montre aussi cependant que les conséquences restent, dans la mesure des connaissances, limitées, grâce notamment aux systèmes de sécurité mis en œuvre.

Un cadre existe, à la fois réglementaire, basée sur des directives, et normatif. En effet, la législation européenne applicable aux systèmes piles à combustible inclut des directives ayant des objectifs « énergies et climat » pour favoriser économiquement leur développement ainsi que des directives concernant la protection de l'environnement (SEVESO III, IED...) ou des travailleurs (ATEX, Basse Tension, ESP...) non spécifique à la pile à combustible. Il existe un cadre normatif abondant et actuellement en évolution. Il s'articule autour de normes internationales telles que la norme IEC 62282-3-100 mais également de normes nationales telles la norme NFPA 853 ou les normes japonaises spécifiques à certains types de piles et tailles d'installation. Ces normes traitent autant de la sécurité de la pile que de celle de ses installations annexes.

L'analyse des mesures définies dans ces normes a été faite à travers une première évaluation des risques présents sur les systèmes piles à combustible.

Les événements redoutés communs à l'ensemble de l'installation ont été identifiés :

- la perte de confinement de substances inflammables ou toxiques sur l'ensemble de l'installation ;
- l'introduction d'air dans les équipements contenant des gaz inflammables.

Puis les événements spécifiques à certaines installations tels que :

- les mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/ air au niveau du cœur de la pile à combustible ou en aval ;
- l'emballement de réaction sur les procédés de reformage ;
- l'accumulation de gaz inflammables au niveau des chambres de combustion des chaudières ou reformeurs.

À partir de ces événements, les aspects relatifs à la gestion du risque ont été analysés dans les différents référentiels. Ainsi, la norme IEC 62282-3-100 propose un management de la sécurité qui prend en compte toutes les phases de vie du système pile à combustible et s'appuie sur une analyse des risques menée dès la conception.

En plus de cette démarche globale, les points qui ressortent de cette analyse vis à vis des barrières de sécurité sont les suivants :

- la configuration des sites (le positionnement des différents équipements de l'installation, le fait que le système pile à combustible soit ou non confiné...) est essentielle dès la mise en place d'une nouvelle installation ;
- la pile à combustible s'appuie sur des systèmes instrumentés de sécurité à la fois pour prévenir et limiter les phénomènes dangereux. Les normes insistent sur la fiabilité de ces systèmes notamment dans le cas de systèmes autonomes ;
- des mesures de ventilation, de drainage et de purge sont à mettre en place pour éviter la formation d'atmosphère explosives ;
- les phases d'arrêt (arrêt normal entre deux phases d'utilisation, arrêts d'urgence...) et de démarrage nécessitent des procédures bien définies.

En conclusion, cette étude a permis d'identifier les profils des installations et leurs applications, les scénarios accidentels et les textes de référence. En particulier elle montre l'importance du cadre normatif qui évolue très rapidement et qui propose des mesures spécifiques pour les nouvelles installations stationnaires. Elle a également mis en évidence un cadre réglementaire qui favorise la mise en place de ces systèmes par des aides économiques et où le régime de classement pour ces technologies dépend des activités annexes présentes (reformage, installations de combustion, méthanisation...) et des quantités d'hydrogène mises en œuvre. Une réflexion pourrait être menée pour évaluer si ces installations nécessitent un régime de classement qui prenne en compte la configuration du site (par exemple site autonome pour alimenter un quartier résidentiel ou installation sur un site industriel existant), les technologies de pile et les puissances présentes.

7. ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
1	Méthodologie	4
2	Composants du corps de PAC de type PEMFC	3
3	Présentation des différents types de piles à combustible	11
4	Auxiliaires à la pile à combustible	4
5	Domaines d'application des piles à combustible	5
6	Retour d'expérience sur les piles à combustible	1
7	Normes relatives aux piles à combustible : IEC 62282-3-100:2002, NFPA 853:2015	4
8	Performance des piles à combustible	1
9	Glossaire et définition	3

ANNEXE 1

Méthodologie

Le rapport a été réalisé sur la base d'une étude bibliographique et d'une enquête internationale qui s'est déroulée d'août à octobre 2016.

Enquête

Cette partie a pour objectif de présenter le profil des participants, les pays ciblés ainsi que le déroulement de l'enquête et de présenter les premiers résultats.

Profil des participants

L'INERIS a contacté des professionnels :

- ayant participé à des projets de recherche et de développement subventionnés par l'ADEME ;
- faisant partie du comité technique ISO/TC 105 qui travaille sur l'élaboration d'une norme spécifique pour les piles à combustible ;
- membres de l'association AFHYPAC ;
- intervenants lors de l'école d'été, qui a eu lieu à Belfort en juillet 2016, sur le thème de la pile à combustible ;
- rencontrés lors du séminaire « Deploying fuel cell buses in European cities and regions » qui a eu lieu le 20 mai 2016 à Bruxelles.

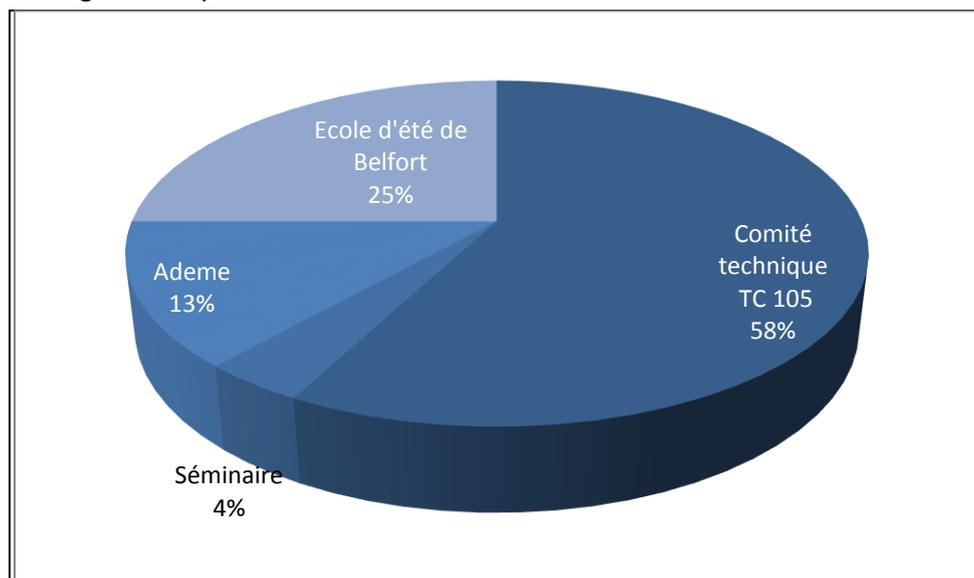


Figure 12 : Source des personnes contactées dans le cadre de l'enquête de 2016

Le profil des personnes ayant répondu est le suivant :

- **75% des personnes interrogées font partie de laboratoires de recherche** et développement qui travaillent sur l'amélioration des performances des piles.
- 17% des participants font partie de starts up et industriels qui vendent tout ou partie des systèmes « pile à combustible »,
- 8% sont des gestionnaires de réseau d'alimentation d'énergie qui financent le développement de ces nouvelles technologies.

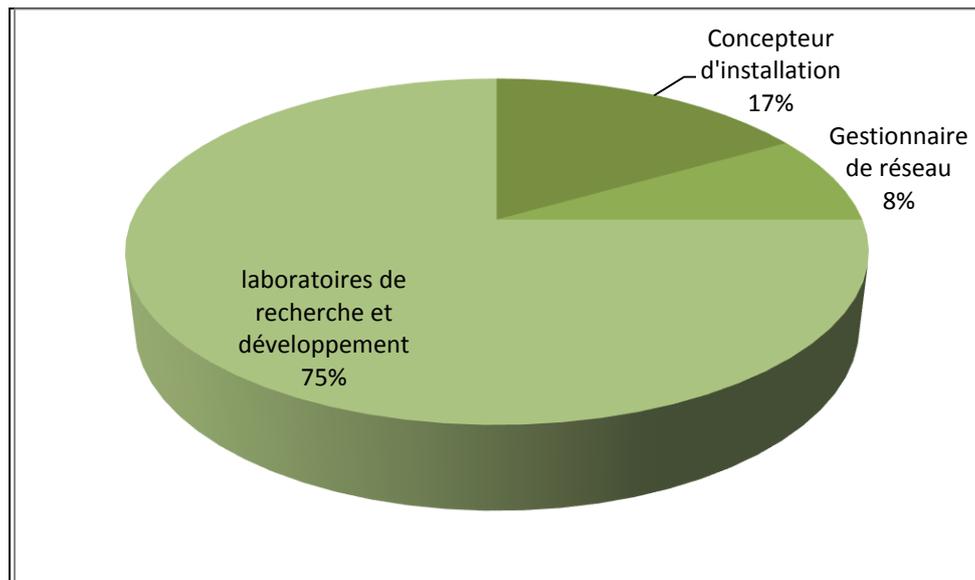


Figure 13 : Profil de personnes contactées dans le cadre de l'enquête de 2016

Pays cibles

L'étude a ciblé des pays ayant des activités de recherche et développement et des installations concernant les technologies de pile à combustible :

- en Europe : Allemagne, Espagne, France, Grande Bretagne, Suède et Suisse ;
- en Amérique du Nord : Canada et États-Unis ;
- en Asie : Chine, Corée et Japon.

Déroulement de l'enquête

Cette enquête s'est déroulée d'août à octobre 2016. Elle a été réalisée par le biais d'un questionnaire téléphonique pour les francophones et électronique pour les autres.

Elle visait à :

- comprendre le fonctionnement des piles à combustible ;
- spécifier les marchés actuels et potentiels ;
- enregistrer les défaillances et les éventuels retours d'expériences ;
- déterminer les mesures de maîtrise des risques associés à ces installations ;
- identifier les réglementations et les guides qui s'appliquent.

46 personnes ont été contactées ; 15 ont répondu à tout ou partie du questionnaire ; cela donne un taux de réponse de plus de 30%.

Les personnes interrogées pouvaient choisir de ne pas répondre à toutes les questions proposées selon leur connaissance des sujets abordés.

Bilan de l'enquête

Cette enquête a permis de :

- 1) dresser un panorama technologique des piles à combustible ;
- 2) visualiser les priorités européennes en termes de recherche et développement ;
- 3) appréhender l'état et les évolutions du marché français ;
- 4) obtenir des informations quant aux retours d'expériences des industriels vis-à-vis de cette nouvelle technologie ;
- 5) connaître le contexte réglementaire en France et les attentes des différents acteurs.

Ces résultats seront plus largement présentés et commentés dans la suite de ce rapport.

Nous devons cependant noter la faible participation de la filière internationale excepté pour le Canada. Nous avons donc dû compléter cette enquête par des éléments issus de la bibliographie.

Étude bibliographique

La recherche bibliographique s'est appuyée sur de nombreux documents et bases de données scientifiques, réglementaires, normatives... Ce paragraphe présente les principales sources. Elles sont détaillées par référence exactes en fin de rapport.

Ce paragraphe reprend les sources pour chaque partie du présent rapport. En effet, les documents utilisés sont spécifiques en fonction des thématiques abordées.

Pour décrire les technologies et enjeux des piles à combustible présentés dans la partie 2, les données proviennent principalement de :

- thèses émises sur le sujet postérieur à 2010 ;
- documents mis en lignes sur le site de l'AFHYPAC <http://www.afhypac.org> et l'IEA <https://www.iea.org> ;
- présentations obtenues lors de l'école d'été sur le thème de la pile à combustible qui a eu lieu à Belfort.

Le retour d'expérience de la partie 3 est issu au niveau bibliographique :

- des bases de données recensant l'accidentologie ;
- des moteurs de recherche généralistes et scientifiques.

Concernant la description du cadre réglementaire et normatif, il a été utilisé :

- les présentations des groupes normatifs ISO/TC 197 et IEC TC 105 du site <http://www.iso.org/>;
- le site <http://www.fuelcellstandards.com/> recensant les différents normes et guides utilisés dans le monde ;
- le site <http://eur-lex.europa.eu/> répertoriant les différentes directives européennes ;
- pour la législation française le site www.ineris.fr/aida.

L'identification des principaux risques a été menée sur la base de :

- précédentes études réalisées par l'INERIS sur les piles à combustible et par analogie avec des études précédentes réalisées sur des nouvelles technologies mettant en œuvre de l'hydrogène ;
- thèses émises sur la dégradation des piles à combustible ;
- normes IEC 62282-3-100 et NFPA-853 ;
- l'expertise de l'INERIS dans le domaine de l'analyse des risques des systèmes industriels.

ANNEXE 2

Composant du corps de PAC de type PEMFC

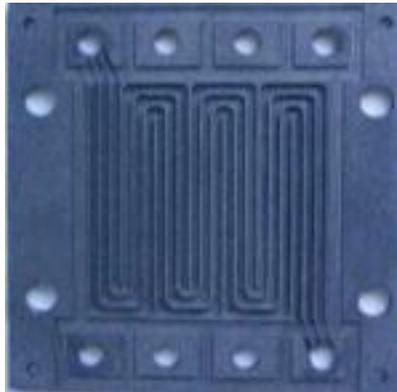
Les piles à combustible de types PEMFC, commercialisées actuellement, sont constitués des éléments suivants : plaques bipolaires, couches de diffusions gazeuses, électrodes, membrane et joints d'étanchéité.

Cette annexe a pour objectif de présenter les principaux composants. Elle décrit à la fois leur rôle ainsi que les matériaux choisis à leur conception.

Plaques bipolaires

Les plaques bipolaires constituent l'ossature de la pile. Elles conduisent le courant. Elles facilitent la gestion de l'eau et de la température, en l'absence de plaques de refroidissements. Elles fournissent des canaux pour l'alimentation en gaz réactifs comme pour l'évacuation des produits.

Pour remplir ces fonctions, différents types de plaques peuvent être utilisés (métal, composite, graphite)¹⁰. De nombreuses recherches sont menées pour trouver un compromis entre résistance à la corrosion et valeur de la résistance de contact ainsi que sur le design des plaques¹¹.



Exemple de plaque bipolaire¹⁸

Couches de diffusion gazeuses

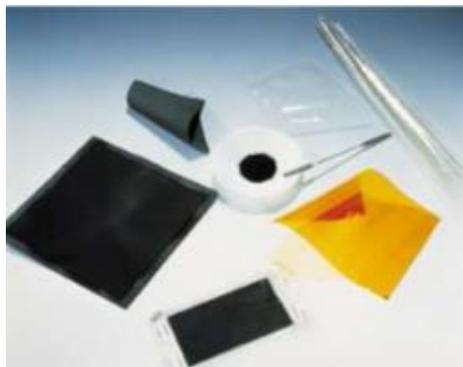
La couche de diffusion gazeuse (GDL), avec sa nature poreuse, joue un rôle essentiel pour assister les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène dans les couches catalytiques. Elle permet aux réactifs de diffuser des canaux d'arrivée jusqu'aux sites actifs électro-catalytiques. La GDL facilite aussi la gestion de l'eau dans la couche catalytique et dans la membrane. Elle permet de diffuser la vapeur d'eau couplée aux réactifs. Elle assure ainsi une humidité suffisante dans la membrane. Elle aide dans un même temps à évacuer l'eau produite du côté de la cathode hors de la pile et empêche ainsi les noyages qui bloqueraient les sites actifs. Les GDL sont connectées électriquement à l'encre catalytique et offrent une structure de support pour les couches de catalyseurs. De plus, elles sont conductrices électriquement pour assurer le transfert d'électrons entre la couche catalytique et les plaques bipolaires. On trouve principalement deux grandes familles de couches de diffusions : les papiers carbonés (GDL non-tissées) et les tissus carbonés (GDL tissées)¹².

Électrodes

Les électrodes sont composées de deux couches : une couche catalytique et un support à base de carbone pour le catalyseur. Une couche catalytique conventionnelle est composée de nanoparticules de platine (Pt) supportées par une surface de noir de carbone en contact étroit avec une quantité contrôlée d'ionomère. Les ionomères sont des polymères modifiés pour inclure des ions, habituellement des groupes sulfoniques. Le support de carbone permet aux nanoparticules d'avoir une forte dispersion (2-3nm) et de fournir une structure poreuse électroniquement conductrice. Cette structure joue un rôle crucial dans le transport des réactifs et des électrons jusqu'aux nanoparticules comme dans l'évacuation des gaz inertes et de l'eau¹³.

Membrane

Les membranes utilisées dans les PEMFC sont des ionomères. Les portions ioniques hydrophiles sont la clé pour permettre le transport des protons à travers la membrane. La membrane la plus utilisée aujourd'hui est la membrane en acide perfluorosulfonique plus communément connue sous le nom de Nafion. Sa structure procure au Nafion une stabilité dans des conditions propices aux réactions d'oxydoréduction. Son épaisseur ne dépasse pas 25 microns. Quand la membrane absorbe l'eau, les domaines ioniques du Nafion gonflent et forment des canaux conducteurs de protons au-dessus d'un seuil critique d'eau.



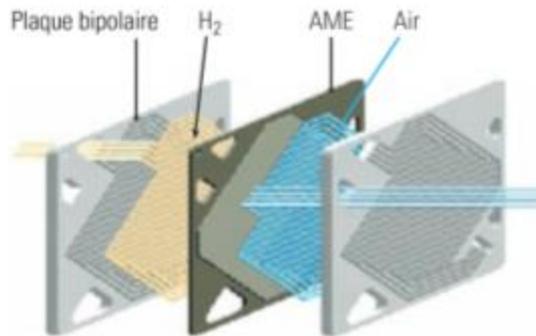
Composants d'une pile PEMFC avec membrane Nafion translucide (en haut à droite), catalyseur en poudre et électrodes¹⁴

La membrane possède plusieurs rôles importants au sein de la cellule. D'abord elle rend possible le transport de protons. Ensuite, elle sert de séparation entre le carburant et l'oxydant. De plus, elle doit être capable de résister à des conditions difficiles dont l'activité des catalyseurs, des fluctuations de température voire des températures élevées ou encore des attaques de radicaux réactif.

C'est généralement la durée de vie de la membrane qui détermine la durée de vie de la pile. Il faut donc être capable de connaître les processus de dégradations.

Jointes d'étanchéité

L'assemblage entre la membrane et les électrodes (aussi abrégé AME) n'est pas seulement une structure de type « sandwich ». Elle inclut les éléments jointifs qui empêchent le carburant de l'anode et l'oxydant de la cathode de se mélanger mais également de fuir vers l'extérieur de la pile. L'AME, les plaques bipolaires et les joints d'étanchéité doivent être parfaitement alignés pour maintenir une force de serrage appropriée entre les différents composants.



Alignement des composants¹⁵

ANNEXE 3

Présentation des différents types de piles à combustible

Pile à membrane polymère (PEMFC)

Principes de fonctionnement

Ce type de pile est celui sur lequel sont actuellement concentrés les plus gros efforts de développement.¹⁶

Modèle	Nom	Température	Combustible	Puissance	Rendement électrique	Rendement thermique
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	50 – 100°C	H ₂	De quelques mW à 1MW	30 – 45	45 – 65

La PEMFC est un type de pile à combustible avec une température de fonctionnement dans la gamme de 50° à 100°C. Le fonctionnement à basse température délivre une densité de courant et de puissance élevés. Cela permet à la cellule d'avoir un design compact, un poids léger et un temps de réponse rapide par rapport aux autres piles à combustible.

Comme son nom l'indique, ce type de pile utilise un électrolyte en membrane échangeuse de protons solide. L'utilisation d'un électrolyte solide a ses avantages. L'imperméabilité des gaz d'anode et de cathode devient plus facile, ce qui rend la fabrication très économique. Contrairement aux électrolytes liquides, les électrolytes solides sont moins susceptibles à la corrosion ce qui permet au système d'avoir une durée de vie plus longue.

Des efforts de recherche sont mis en œuvre pour augmenter les performances et diminuer le coût, aussi bien de la pile elle-même que de ses périphériques. Les enjeux sont considérables.

Schéma de fonctionnement d'une PEMFC ¹⁷	Pile CEA de 80 kWe Genepac composée de deux modules de 40 kWe ¹⁸

Avantages et inconvénients

Les avantages attribués de la PEMFC sont les suivants :

- fonctionnement à basse température, donc démarrage rapide ;
- électrolyte solide ;
- excellente fiabilité démontrée jusqu'à 100 000 h sans dégradation notable ;
- bon comportement aux basses températures (jusqu'à -30°C).

Ces avantages sont altérés par quelques inconvénients :

- le besoin d'utiliser des métaux précieux, le platine et le ruthénium, donc chers, comme catalyseurs des réactions électrochimiques aux électrodes ;
- la membrane électrolyte conductrice protonique chère et limitée en température d'utilisation (85°C actuellement avec la famille des Nafion) ;
- la sensibilité au CO (moins de 10 ppm requis).

Pile à oxyde solide SOFC

Principes de fonctionnement

Ce type de pile suscite actuellement un très grand intérêt compte tenu de ses performances présentes et potentielles ainsi que de son insensibilité au monoxyde de carbone.

Modèle	Nom	Température	Combustible	Puissance	Rendement électrique	Rendement thermique
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	600 – 1000°C	H ₂ , CH ₄ O, CH ₄	Jusqu'à 10MW	30 – 60	40 – 60

Les piles SOFC, dites à « électrolyte oxyde solide » fonctionnent à haute température de 650 à 1000°C. Ce niveau de température est nécessaire pour que l'électrolyte utilisé (habituellement de la zircone dopée à l'yttrium) ait une conductivité ionique suffisante.

Ce niveau de température permet à ces piles d'être beaucoup moins sensibles que les autres aux impuretés. Par exemple, le monoxyde de carbone CO, impurété pour plusieurs types de piles devient au contraire un combustible pour une pile de type SOFC.

Le point de fonctionnement généralement choisi conduit à un bon rendement électrique de l'ordre de 50-60%. Le haut niveau de température de la chaleur rejetée (600-700°C) permet d'améliorer sensiblement ce rendement en valorisant cette chaleur par couplage avec une turbine à gaz suivie éventuellement d'une dernière récupération de chaleur, destinée au chauffage par exemple.

Il faut noter, par ailleurs, que la température élevée de fonctionnement et la formation de vapeur d'eau permettent un reformage interne (direct ou indirect) à l'anode, d'un combustible carboné (gaz naturel, kérosène, méthanol...). Cette caractéristique fait que la pile SOFC est parfois décrite comme une pile au gaz naturel.

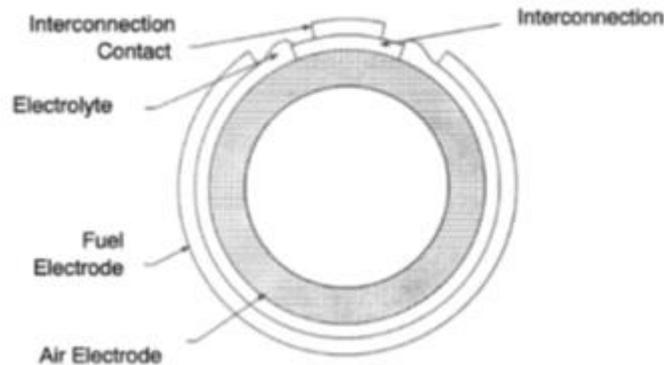
Schéma de fonctionnement d'une SOFC ¹⁷	Module plan testé par le Centre de Jülich ¹⁹

Technologies développées

Deux grandes familles technologiques sont développées :

- *la technologie tubulaire*

Cette technologie est essentiellement par Westinghouse Electric Corp et Mitsubishi Heavy Industries et comprend un cylindre en céramique poreuse qui sert de support. Il est recouvert extérieurement de couches successives faisant office de cathode, d'électrolyte, d'anode et enfin, un dépôt servant d'inter connecteur. L'intérieur du tube support sert à la distribution d'air tandis que le combustible est amené par l'extérieur.

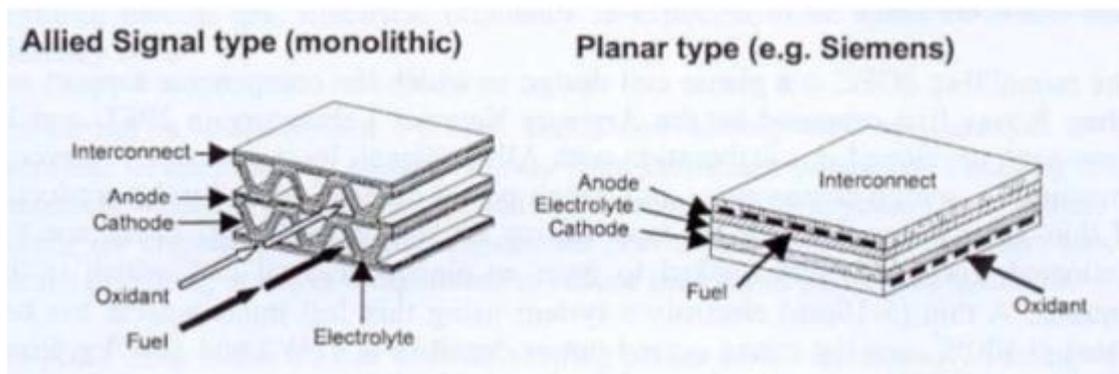


Technologie cylindrique (air au centre, combustible à l'extérieur)¹⁹

- *la technologie plane*

Cette technologie est plus récente. Tous ses composants étant actifs, elle permet d'obtenir des blocs plus compacts conduisant aux améliorations suivantes : abaissement de la masse, de l'encombrement, des pertes thermiques et donc une montée plus rapide en température. Une difficulté de cette technologie réside dans la mise au point de plaques d'interconnexion assurant à la fois une bonne conduction électrique, une bonne tenue mécanique – à la corrosion et une bonne étanchéité. L'un des objectifs majeurs est de parvenir à fonctionner dans la gamme basse des températures (vers 700°C). Cela permet de choisir des plaques d'interconnexion en métal et non en céramique, gagnant ainsi sur la tenue mécanique et le coût.

La technologie monolithique est une variante de la technologie plane ; elle en diffère par le fait que les composants se supportent mutuellement.



Technologies plane et monolithiques²⁰

Avantages et inconvénients

Les avantages attribués à cette famille sont les suivants :

- une bonne fiabilité ;
- des rejets thermiques à une température élevée (vers 600 - 700°C), donc faciles à évacuer et éventuellement valorisables en énergie électrique via une chaîne thermodynamique en aval (turbine à gaz) ;
- pas de catalyseurs précieux ;
- un reformage aisé d'éventuels combustibles carbonés directement à l'anode.

Les inconvénients sont les suivants :

- une température de fonctionnement élevée, donc un temps de démarrage relativement long : c'est donc une technologie réservée à des applications de longue durée ;
- la fragilité de la céramique qui supporte mal les différentiels de température.

Pile à carbonate fondu MCFC

Principes de fonctionnement

Cette filière partage, avec la PEMFC, les records de vente dans le monde. Plus de 110 installations (septembre 2014) de piles de 300 kW (DFC300) à 2,4 MW (DFC3000) ont été vendues depuis 1970.¹⁶

Ce type de pile fait partie des piles à « électrolytes liquides fonctionnant à haute température (vers 650°C) ». Cette haute température permet une valorisation intéressante des calories rejetées à haut niveau thermique et en particulier le couplage avec turbine à gaz en aval et le reformage direct à l'anode de combustibles type hydrocarbures.

Modèle	Nom	Température	Combustible	Puissance	Rendement électrique	Rendement thermique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	600 – 660°C	H ₂ , CH ₄ O, CH ₄	50kW – 10MW	40 – 60	40 - 50

Les MCFC sont les piles à combustible présentant la meilleure résistance aux impuretés issues des réactions chimiques. Ce type de pile à combustible est majoritairement utilisé pour des utilisations stationnaires et pour des fortes puissances (entre 100 kW et 100 MW). Néanmoins, la maintenance est plus importante que pour des types SOFC.

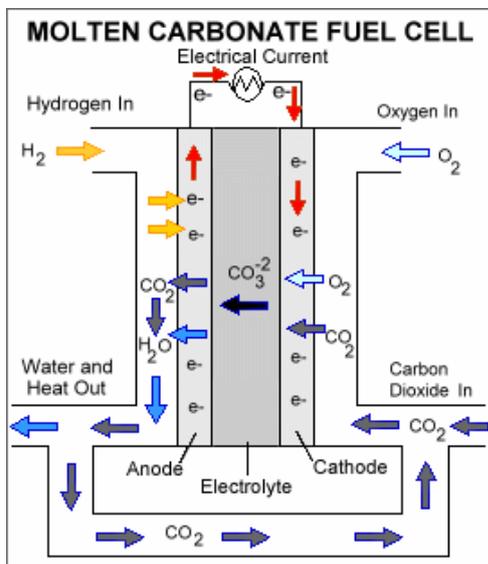


Schéma de fonctionnement d'une MCFC¹⁷



Pile MTU à l'OPAC de la Porte Briançon (Paris)²¹

Avantages et inconvénients

Les avantages attribués à cette pile sont les suivants :

- bonne fiabilité ;
- rejets thermiques à une température élevée (vers 600°C), donc éventuellement valorisables en énergie électrique via une chaîne thermodynamique en aval (turbine à gaz).

Les inconvénients sont les suivants :

- électrolyte liquide et corrosif (carbonates fondus) ;
- technologie onéreuse.

Pile alcaline AFC

Principes de fonctionnement

C'est le type de pile dont le développement est le plus ancien (1932). La NASA l'avait sélectionnée au début des années soixante pour ses futurs vols habités Apollo et Navette.

Modèle	Nom	Température	Combustible	Puissance	Rendement électrique	Rendement thermique
AFC	Alkaline Fuel Cell	25 – 260°C	H ₂	10kW – 100kW	55 – 60	<30

Le principe de fonctionnement est extrêmement simple : il s'agit d'une oxydoréduction, électrochimique et contrôlée, d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur.

Schéma de fonctionnement d'une pile AFC ¹⁷	Module de PAC du « Space Shuttle » de la NASA ²²

Avantages et inconvénients

Les avantages de la AFC sont :

- sa température de fonctionnement dans une gamme large (25 à 260°C) ;
- des performances élevées du fait de la vitesse des réactions chimiques mises en jeu ;
- un fonctionnement possible avec des catalyseurs non précieux ;
 - a. anode : Pt ou Ni de Raney ou borure de nickel,
 - b. cathode : alliage Pt-Au ou Ag.

Les inconvénients se résument aux points suivants :

- la corrosion des électrodes et autres pièces métalliques provoquée par l'électrolyte liquide qui conduit à des choix de matériaux au coût élevé ;
- la durée de vie limitée à des valeurs (de l'ordre de 8 000 h) inacceptables pour les applications stationnaires. Ce constat serait à corriger en cas de mise au point d'une membrane anionique solide,
- la difficulté à minimiser le volume d'une telle pile,
- un empoisonnement rapide de l'électrolyte par le CO₂ si on utilise l'air ambiant à la cathode dans les applications terrestres. De ce fait, ce type de pile n'a d'intérêt que si l'on dispose d'hydrogène et d'oxygène purs ;
- le besoin d'O₂ pur ;
- la nécessité de traiter l'électrolyte à l'extérieur de la pile pour le purger de l'eau issue de la réaction électrochimique (en effet, une partie de l'eau formée se retrouve dans l'électrolyte), ce qui conduit à la mise en place d'un sous-système supplémentaire qui grève le coût, la masse et le volume.
- un mauvais rendement thermique.

Pour conclure sur les AFC :

Si la technologie alcaline basée sur un électrolyte liquide handicape considérablement cette filière au point que toutes les tentatives industrielles (sauf une) se sont soldées jusqu'ici par un échec, il reste une issue sur laquelle de nombreux laboratoires se sont investis, à savoir le développement d'une membrane solide anionique.

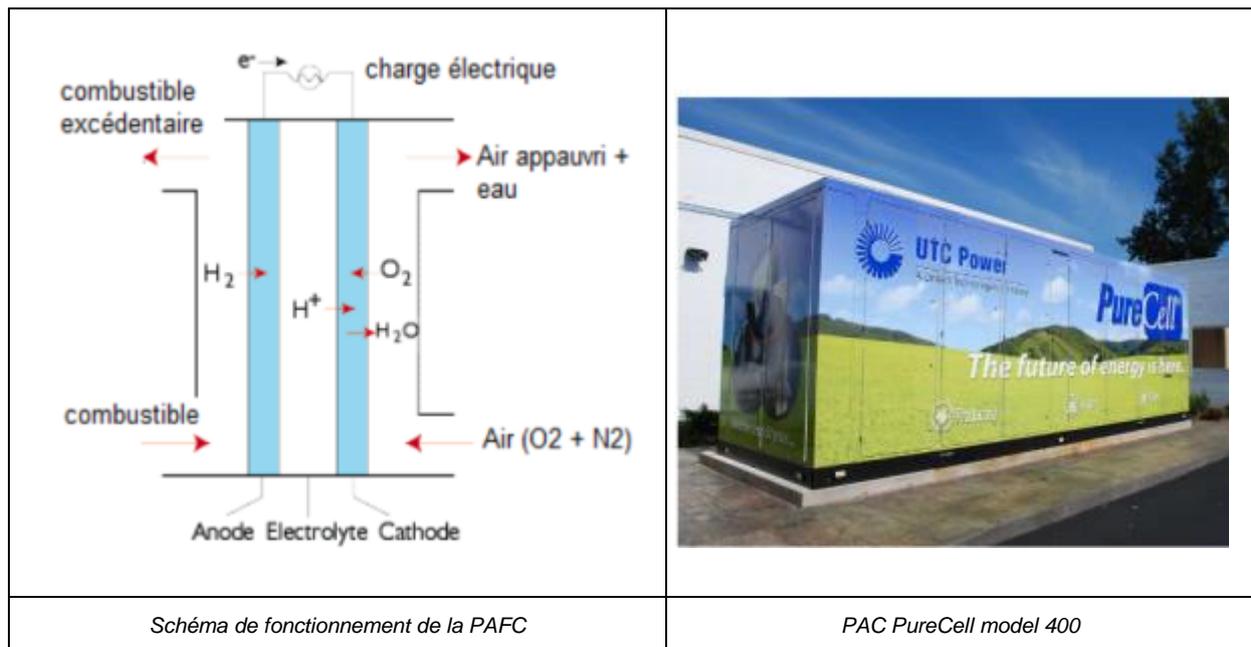
Pile à acide phosphorique PAFC

Principes de fonctionnement

Aujourd'hui, la pile à combustible à acide phosphorique possède une technologie très mature, grâce essentiellement aux japonais et à la société américaine UTC Power, disparue en 2013. Ce sont les applications stationnaires en cogénération de 50 à 5 000 kWe qui regroupent aujourd'hui ses développements. Certaines de ces piles fonctionnent encore aujourd'hui, avec un rendement global, thermique et électrique, proche de 90%.

Modèle	Nom	Température	Combustible	Puissance	Rendement électrique	Rendement thermique
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	190-210 °C	H ₂	100kW – 400kW	40%	45%

La pile à combustible à acide phosphorique est une pile basse température dans une gamme de 190 à 210 °C ayant un électrolyte sous forme liquide. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion des électrodes en carbone.



Avantages et inconvénients

Les avantages attribués à cette pile sont les suivants :

- l'application pour la cogénération (température autour de 200°C) ;
- disponibilité commercialement disponible, durée de vie longue, et retour d'expérience ;
- la tolérance à la présence de CO.

Ses inconvénients sont les suivants :

- le fonctionnement continue qui est possible uniquement pour un usage stationnaire car elle ne supporte pas les arrêts ;
- l'électrolyte s'évapore et les électrodes sont corrodées par le milieu acide de la pile ;
- le catalyseur précieux (platine).

ANNEXE 4

AUXILIAIRES A LA PILE À COMBUSTIBLE

Cette annexe a pour objectif de présenter les différents auxiliaires d'une pile à combustible qui constitue un système pile à combustible. Elle a été développée ici autour des technologies PEMFC et SOFC.

Alimentation en fluide

L'alimentation en fluide comprend les circuits d'alimentation en combustible et d'oxydant. Leur objectif est de fournir les réactifs adéquats dans les proportions nécessaires pour que la PAC puisse, après réaction chimique, produire de l'électricité.

Cette partie du procédé peut comprendre des spécificités en fonction de la technologie de piles utilisées. Dans le cas des PEMFC, il est nécessaire d'humidifier l'air entrant et dans le cas des SOFC, les gaz entrants, combustible et oxydant, sont préalablement chauffés.

Alimentation en combustible

Le combustible employé peut être soit de l'hydrogène soit un combustible carboné tel que le gaz naturel, le kérosène ou le méthanol.

Alimentation directe par un combustible carboné

L'alimentation directe en combustibles carbonés est spécifique aux piles à combustible à haute température, MCFC ou SOFC par exemple, qui comprennent un reformage interne.

Alimentation directe par de l'hydrogène

Les piles à basse température telles que la PEMFC sont alimentées en hydrogène directement.

L'hydrogène est fourni :

- *soit par un stockage d'hydrogène gazeux ;*

Il est stocké principalement sous pression mais il peut être également sous forme solide avec les hydrures. L'hydrogène, stocké sous pression, est préalablement détendu avant d'alimenter la pile.

- *soit par reformage externe à la pile d'un combustible carboné et non interne comme dans le cas des MCFC et SOFC.*

Reformage externe de la PAC

Le procédé de production d'hydrogène par reformage s'effectue en trois étapes :

- *la génération du mélange initial ;*

La production de gaz de synthèse est réalisée principalement par vaporeformage. Le reformage à la vapeur consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse qui comprend H_2 , CO , CO_2 et H_2O . Cette réaction nécessite de la vapeur d'eau, un catalyseur tel que le nickel ainsi que des températures élevées (840 à 920°C) et à pression modérée (de l'ordre de 20 à 30 bar).

Dans le cas des piles à combustible de type PEM, cette chaleur est apportée par une combustion additionnelle de carburant, ce qui nécessite un brûleur au gaz naturel.

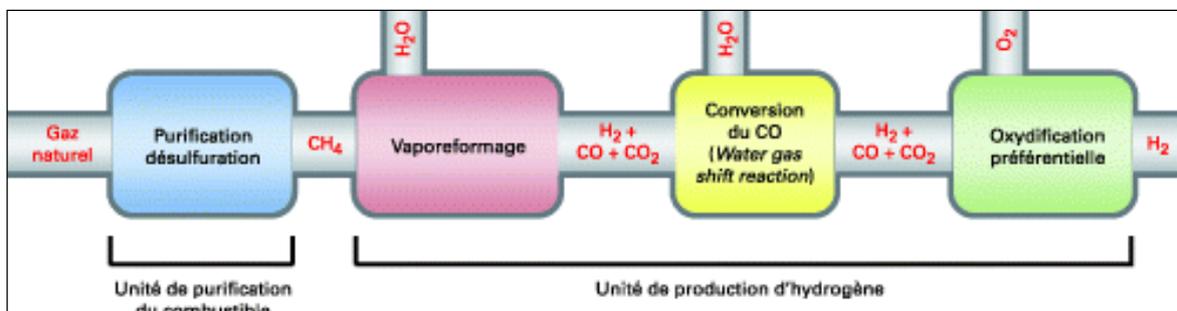
- la réaction du monoxyde de carbone et de l'eau ;

Il s'agit là de faire réagir le monoxyde de carbone et l'eau pour obtenir de l'hydrogène supplémentaire. C'est une réaction exothermique qui s'effectue généralement en deux étapes successives : d'abord à haute température (340 à 450°C) puis à basse température (200 à 250°C).

- la purification de l'hydrogène.

Il est indispensable de purifier le mélange dans la mesure où il contient du monoxyde de carbone qui constitue un poison pour le platine employé dans les piles.

Dans le cadre du gaz naturel, le reformage est également précédé d'une opération de désulfuration qui permet de retirer l'odorant chimique présent dans le gaz naturel.



Description du processus de reformage et purification de l'hydrogène à partir du gaz naturel²³

Paramètres de fonctionnement de l'alimentation de la PAC

La pile est alimentée en hydrogène par un système de régulation qui impose le débit et la pression qui est sensiblement égale à celle de l'oxydant pour limiter les efforts mécaniques transverses sur la membrane.

Alimentation en oxydant

La pile est alimentée en oxygène. Il provient principalement de l'air même si dans de rares cas l'oxygène en bouteille peut être utilisé.

L'oxygène de l'air est fourni à des pressions qui varient selon les constructeurs, de quelques centaines de millibars à 1,5 bar (pressions relatives). Dans le premier cas un simple circulateur d'air suffit, tandis que dans le second un compresseur est nécessaire.

Dans ce dernier cas, le compresseur doit éviter les différentiels de pression pour ne pas dégrader la membrane et apporter de l'air en continu. De plus, il ne doit pas apporter d'huile qui est un poison pour la membrane. Pour répondre à ces critères, il est privilégié des technologies telles que le compresseur spiro-orbital dit « scroll » ou à double vis.

SPECIFICITES EN FONCTION DES PILES UTILISEES

Humidification des gaz dans le cas des PEMFC

Dans le cas des PEMFC, l'humidification des gaz a pour objectif de maintenir une hydratation effective de la membrane et un bilan hydrique suffisant. Les deux gaz peuvent être humidifiés ou à minima l'air.

Cette fonction peut être assurée de deux façons :

- soit le ou les gaz traversent un humidificateur avant d'alimenter la pile,
- soit la membrane est directement humidifiée par remontée capillaire.

Chauffage des gaz dans le cas des SOFC

Du fait de sa température élevée de fonctionnement, une pile à combustible SOFC nécessite pour fonctionner dans des conditions optimales que l'on échauffe ses réactifs préalablement à leurs admissions. Ceci permet de préserver le caractère isotherme du système en évitant la naissance d'hétérogénéités de températures dommageables aux matériaux les constituants.

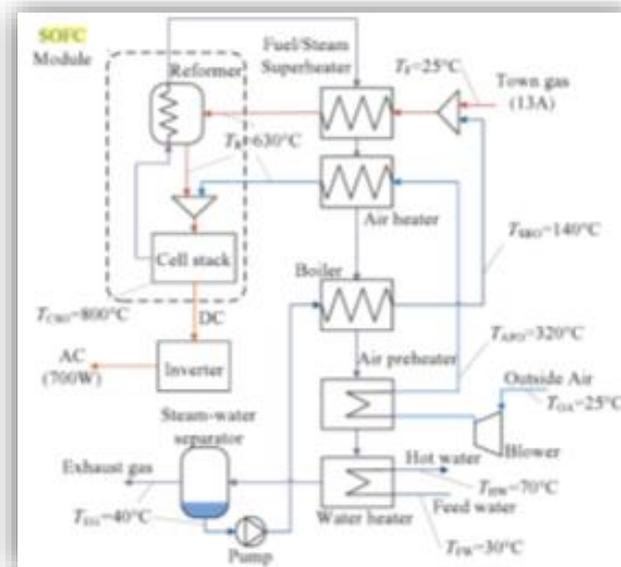


Schéma de principe de fonctionnement d'un système de SOFC²⁴

Gestion de la température des cœurs de pile

La température doit être contrôlée à un niveau et d'une manière qui dépendent de l'application visée. La gestion de la température comprend le refroidissement du module de la pile à combustible pour les PEMFC et un chauffage à très haute température pour les SOFC. C'est un élément critique qui impacte autant les performances de la pile mais également la sécurité.

Dans le cas de la PEMFC, la puissance thermique produite dans la cellule est du même ordre que la puissance électrique. Elle doit être évacuée pour éviter la surchauffe ainsi que la détérioration de la membrane due à des points chauds. Cette usure préalable peut engendrer des situations dangereuses notamment en cas de fuite d'hydrogène ou d'oxygène.

Plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour évacuer la chaleur : soit par circulation d'un liquide caloporteur ou par injection d'air. Le circuit de refroidissement inclura donc une boucle liquide ou gazeuse avec son circulateur et éventuellement un échangeur thermique vers l'extérieur.

Les SOFC sont chauffées électriquement ou par une combustion de gaz naturel à de très hautes températures de l'ordre de 800°C- 1000°C. Une fois à température de fonctionnement nominal, la pile est régulée à température en modulant les débits d'air d'alimentation ou présent autour de l'équipement.

Des études sont actuellement menées pour améliorer la durabilité des matériaux à haute température et diminuer la température de fonctionnement nominal à des températures de l'ordre de 500-600°C.

Traitement des rejets

Les gaz alimentant la pile sont injectés de manière à respecter la stœchiométrie afin de correspondre à la consommation de la pile ou plus généralement en excès. Dans ce dernier cas, l'hydrogène et l'oxygène sont partiellement consommés.

Ces gaz excédentaires peuvent soit être rejetés, soit alimenter d'autres installations (bruleurs ou turbine) ou soit recirculer pour éviter les pertes. Lors de la recirculation, le principe de la récupération consiste, pour les PEMFC, à faire circuler le gaz dans une boucle. Des gaz frais sont injectés pour compenser la consommation électrochimique. Il est également nécessaire d'éliminer les traces d'eau contenues dans les gaz, issue de la pile, par un dispositif de condensation et d'évacuation de l'eau liquide.

L'eau condensée est soit rejetée, soit recirculée pour humidifier la membrane ou soit utilisée pour alimenter d'autres installations (échangeur thermique dans le cadre d'une cogénération).

Récupération de l'électricité

Le système électrique est produit sous faible tension continue et forte intensité alors que l'utilisation sur un réseau exige un courant alternatif sous une tension normalisée. Il est donc nécessaire d'utiliser un convertisseur continu-alternatif qui prend en charge cette adaptation.

Système de contrôle commande

Le système complet est nécessairement équipé de nombreux capteurs de débit, de pression, de température, d'intensité, de tension, qui doivent être analysés en

continu pour piloter les divers composants ainsi que les procédures de démarrage et d'arrêt. Un ensemble de contrôle commande assure ces diverses fonctions.

ANNEXE 5

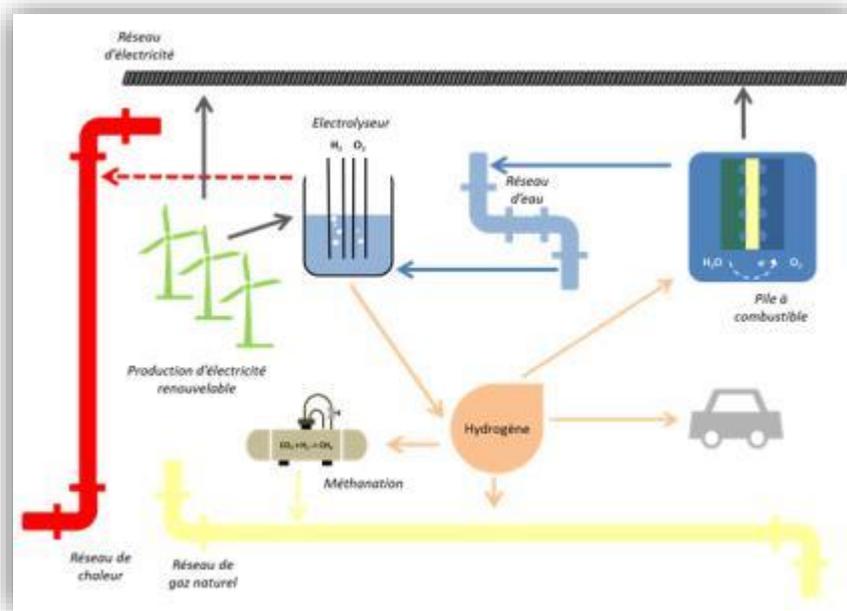
DOMAINES D'APPLICATION DES PILES À COMBUSTIBLE

Dans cette annexe, sont présentées les différentes applications pouvant être associées à la pile à combustible.

Pile à combustible associée aux énergies renouvelables

L'intégration des énergies renouvelables s'associe à l'augmentation de la flexibilité du réseau électrique, le stockage et déstockage de l'énergie en fonction des besoins.

Des systèmes « Power to power » peuvent être utilisés comme système de stockage. Dans ce cas, l'électricité est transformée en hydrogène par électrolyse, stockée puis retransformée en électricité en cas de besoin à l'aide d'une pile à combustible ou une turbine à gaz d'hydrogène.



Exemple d'installation associée aux énergies renouvelables

Ces systèmes sont actuellement peu mis en place du fait des coûts des équipements tels que l'électrolyseur et la pile à combustible, de la génération de sous-produits tels que l'oxygène, des faibles rendements et la production de chaleur.



Rendement de conversion pour un système Power to Power²⁵

Un développement est possible si l'hydrogène et la chaleur sont valorisés en plus de l'électricité.

Pile à combustible dans l'industrie

L'hydrogène est généré comme coproduit sur certains sites comme l'industrie sidérurgique ou raffinerie. Cet hydrogène peut être transformé en électricité au moyen d'une pile puis utilisé comme source d'alimentation interne du site industriel

ou pour fournir le réseau. Ces systèmes nécessitent un stockage d'hydrogène et une purification de l'hydrogène s'ils sont associés à une PEMFC.

Pile à combustible et la cogénération

La cogénération permet la production simultanée d'électricité et de chaleur. Cette production simultanée permet d'améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment par rapport à un système d'alimentation simple. La production décentralisée d'électricité et de chaleur à l'aide de systèmes de micro-cogénération présente un avantage en l'absence de réseau existant.

Les systèmes de piles à combustible micro-cogénération fonctionnant au gaz naturel sont une alternative aux systèmes conventionnels par moteur à combustion. Actuellement, le rendement électrique de piles à combustible micro-cogénération est d'environ 42%, soit 10% plus haut que celui des systèmes de micro-cogénération par moteur à combustion. L'inconvénient est le coût d'investissement beaucoup plus élevé. Le système par moteur à combustion coûte environ 2200 dollar par kW alors que le système à pile à combustible coûte 9000 dollar par kW²⁶ pour des applications commerciales et plus de 18000 dollar par kW²⁷ pour les systèmes domestiques.

Les systèmes micro-cogénération à combustible reposent sur une technologie PEMFC ou SOFC. Cette dernière pile fournit davantage de chaleur.

Application	Puissance ou capacité énergétique	Efficacités énergétiques	Coût d'investissement	Durée de vie	Maturité
Pile à combustible pour la micro-cogénération	0,3 à 25 kW	Électricité uniquement : 35 à 50% Cogénération (électricité + chaleur) : jusque 95%	< 20 000 Dollar par kW (système chez les particuliers, de l'ordre de 1 kW _e) < 10 000 Dollar par kW (système commercial, de l'ordre de 25 kW _e)	60 000 à 90 000 heures	Premiers stades d'introduction sur le marché

Performances en 2013 des systèmes de piles à combustible pour la micro-cogénération²⁸

État actuel du marché international

Concernant l'Europe, de plus en plus de projets de démonstration sont en cours de lancement avec une remarquable concentration de l'activité en Allemagne, motivée par la perspective d'exploiter les énergies renouvelables.

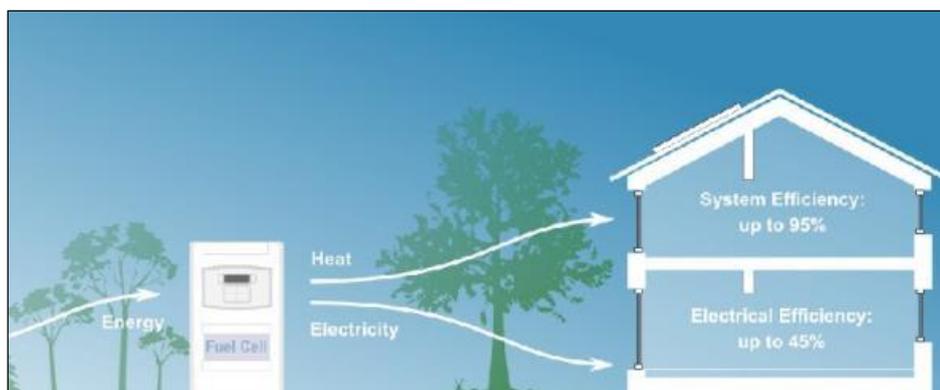


Schéma de principe de la cogénération avec pile à combustible pour une habitation²⁹

En France les distributeurs d'énergie sont dans les premiers stades de la commercialisation de systèmes de micro-cogénération pour le domaine résidentiel. Cette mise sur le marché est accompagnée par des projets européens comme ene.field.

Deux technologies de pile à combustible sont privilégiées : PEMFC et SOFC. Elles ont été développées par les fabricants souvent en partenariat avec des sociétés japonaises.

Technologie	Fabricants
PEMFC	BAXI, BALLARD POWER SYSTEMS EUROPE, ELCORE, RIESAER BRENNSTOFFZELLENTCHNIK
SOFC	BOSCH THERMOTECHNOLOGY, CERES POWER, HEXIS, VAILLAND, DE DIETRICH

Tableau 15 : Principaux fournisseurs de systèmes de cogénération sur le marché français

Au niveau international, le Japon est leader avec l'installation de 120 000 systèmes de cogénération baptisé « Ene-farm ». Ces systèmes ont été et sont fournis par des entreprises telles que Toshiba ou Panasonic. Ses solutions ont été privilégiées suite à Fukushima.

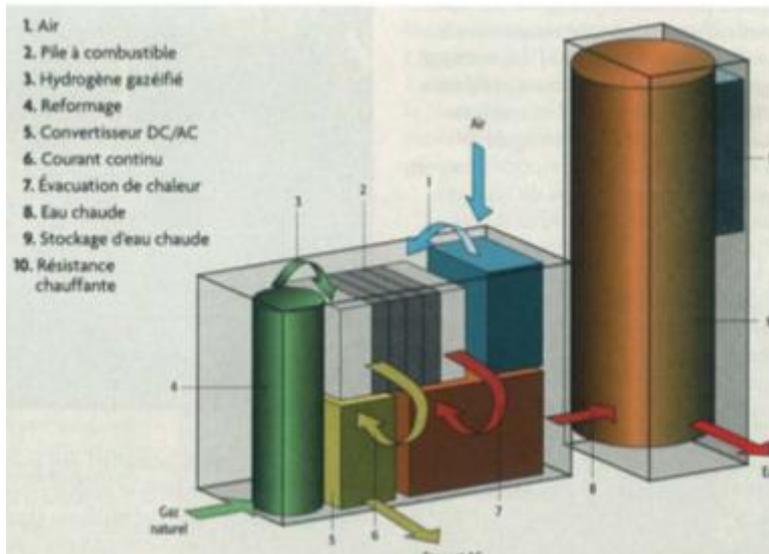


Schéma de principe de la pile à combustible Ene-Farm



Exemple d'installation Ene-Farm

Perspectives de développement dans les années à venir

800 000 piles à combustible en Europe en 2050 : c'est la perspective de l'étude de Roland Berger strategy parue en 2015 pour les systèmes micro-cogénération.

Avec la technologie SOFC, le projet « Callux », en Allemagne, a mis en évidence une diminution moyenne de 25 % de la consommation de gaz naturel pour le chauffage et l'eau chaude.

Le développement de ces systèmes de cogénération est lié aux différentiels de prix entre l'électricité et le gaz ainsi qu'à l'évolution réglementaire. Au niveau économique, en cas d'alourdissement de la facture d'électricité, nul ne doute que cette solution a un réel avenir en France et plus globalement en Europe.

Autres applications de niche de la pile à combustible

Il existe d'autres applications niches pour la pile à combustible. Il s'agit de systèmes d'alimentation en énergie autonome pour des installations isolées ou des systèmes d'alimentation de secours pour pallier d'éventuelles coupures électriques. Les piles à combustible utilisées pour ces applications s'étalent sur une large gamme allant du kilowatt à plusieurs mégawatts.

Les piles à combustible sont utilisées pour alimenter par exemple des tours de télécommunication, des équipements de réseau. Dans ces cas, la pile à combustible remplace les groupes électrogènes. Elles ont comme avantages des durées de vie plus longues et nécessitent moins de maintenance. Pour les systèmes de l'ordre de plusieurs kilowatts, la technologie PEMFC sont privilégiés et pour les systèmes de l'ordre du mégawatt, les systèmes MCFC voire SOFC sont mises en œuvre.

La plupart de ces systèmes reposent sur une alimentation en gaz naturel mais d'autres combustibles liquides tels que le méthanol, éthanol, gaz de pétrole liquéfié (GPL) et des combustibles gazeux tels que le biogaz, le propane, le butane et les gaz de synthèse issus de la combustion du charbon peuvent également être utilisés.

ANNEXE 6

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES PILES À COMBUSTIBLE

Pays	Année	Entité impliquée	Équipement ou auxiliaire concerné	Type d'accident	Phénomène	Cause de l'accident	Description et cause détaillée de l'accident	Conséquence de l'accident	Source
NC	2001	Laboratoire	Alimentation en oxygène	Feu	Surchauffe du système	Alimentation en oxygène à la place de l'air	Surchauffe due à une erreur d'alimentation par de l'oxygène gazeux à la place de l'air. Cette erreur a eu comme conséquence une densité de courant plus élevée que prévue	Dégât matériel limité à l'équipement et au câblage en aval	https://h2tools.org/lessons/small-electrical-fire-resulting-improper-equipment-configuration
NC	1999	NC	Branchement électrique	Dysfonctionnement	Usure prématurée du matériel	Défaut de mise à la terre	Défaut de mise à la terre sur une cellule suite à une opération de maintenance	Mise en défaut de la pile	Fuel cells: current technology challenge and future research
France	NC	Système micro cogénération	Système de refroidissement	Dysfonctionnement	Encrassement de l'échangeur	Eau sale dans le circuit de chauffage	Encrassement du réseau de chauffage qui a provoqué un défaut de refroidissement et une surchauffe du cœur de pile	Mise en défaut de la pile	Enquête réalisée en 2016
NC	NC	Système isolé	Batterie	Dysfonctionnement	Surchauffe de la batterie associée au système PAC	Défaut de conception de la batterie	NC	Mise en défaut de la pile	Enquête réalisée en 2016
NC	NC	NC	Alimentation en eau	Dysfonctionnement	Assèchement de la membrane	Coupure d'eau Dysfonctionnement du système de purification d'eau Gel en amont	Défaut d'approvisionnement en eau qui a provoqué une augmentation de la température dans le cœur de pile et un assèchement probable de la membrane	Mise en défaut de la pile	Enquête réalisée en 2016
NC	NC	Industriel	Défaut d'un module sur l'ensemble du stack	Dégradation de la membrane	Déséquilibre de la pression dans le cœur de pile	Dégradation de la membrane sur du long terme Défaut d'alimentation d'un des réactifs	Dysfonctionnement d'une cellule sur les 4 présentes. Performance maintenue par la mise en parallèle des stacks	/	Enquête réalisée en 2016
France	NC	Laboratoire	Alimentation	Fuite d'H2	Court-circuit	Arrivées d'impuretés (conducteur) Défaut d'assemblage	Court-circuit au niveau de la pile. Défaut de branchement d'un capteur hydrogène suite à un changement d'essai et fuite hydrogène détectée de manière retardée par un autre détecteur	Ventilation de l'hydrogène émis et mise en défaut de la pile	Enquête réalisée en 2016

ANNEXE 7

NORMES RELATIVES AUX PILES À COMBUSTIBLE :
IEC 62282-3-100 :2012
NFPA 853 :2015

Norme IEC 62282-3-100
Technologies des piles à combustible
Systèmes à piles à combustible stationnaires-Sécurité

La norme CEI 61282-3-100 s'applique aux systèmes à piles à combustible stationnaires : c'est-à-dire la pile et les auxiliaires. Elle couvre uniquement les conditions qui peuvent générer d'une part des dangers pour les personnes, et d'autre part des dommages à l'extérieur du système à piles à combustible.

Le tableau suivant reprend un résumé du contenu des parties 4 à 7 qui portent sur les mesures de maîtrise des risques.

Partie 4 : <u>Exigences de sécurité et mesures de protections</u>	4.1	<u>Stratégie de sécurité générale</u> Ce chapitre porte sur l'obligation du fabricant de réaliser par écrit une analyse des risques.
	4.2	<u>Environnement physique et conditions de fonctionnement</u> Ce chapitre indique que le système pile à combustible et les systèmes de protection doit être conçus et construits de manière à remplir leurs fonctions dans l'environnement physique et contient des exigences sur les arrivées des combustibles, de l'énergie électrique, de l'eau, vis-à-vis des vibrations, du transport...Il expose l'obligation de la mise en place d'un système de purge pour l'arrêt et le démarrage.
	4.3	<u>Sélection des matériaux</u> Ce chapitre décrit le choix des matériaux de construction et les conditions d'exposition à prendre en compte.
	4.4	<u>Exigences générales</u> Ce chapitre reprend des exigences générales (conception des pièces, leur fixation, le bruit, la température de surface, le traitement des rejets...)
	4.5	<u>Équipement sous pressions et tuyauteries</u> Ce chapitre est spécifique aux équipements sous pressions et tuyauteries. Il fait les liens vers les référentiels existants pour chaque installation.
	4.6	<u>Protection contre les dangers d'incendie ou d'explosion</u> Ce chapitre décrit la prévention et protection contre les dangers d'incendie et d'explosion. Il comprend des exigences détaillées vis-à-vis des brûleurs.
	4.7	<u>Sécurité électrique</u> Ce chapitre reprend les exigences de conception et de construction du système électrique. Il donne les liens vers les référentiels existants en fonction du domaine d'application.
	4.8	<u>Compatibilité électromagnétique</u> La pile ne doit pas produire de perturbations électromagnétiques et posséder un niveau adéquat d'immunité.
	4.9	<u>Systèmes de commandes et composants de protection</u> Ce chapitre est spécifique aux systèmes de commandes. Il détaille les phases de mise en marche, d'arrêt, les différents modes de fonctionnement et commandes. Il spécifie les exigences de commande à distance et vis-à-vis des dispositifs de protections (des interrupteurs de surintensité, des limiteurs de température, des pressostats différentiels, des débitmètres, des relais temporisés, des limiteurs d'emballements...)

	4.10	<u>Équipement à énergie pneumatique et hydraulique</u> Ce chapitre reprend les exigences vis-à-vis des équipements à énergie pneumatique ou hydraulique. Il fait les liens vers les référentiels existants.
	4.11 - 4.15	Ces chapitres sont spécifiques à certains composants et équipements des systèmes piles à combustibles : vannes, équipements rotatifs, compresseurs, pompes, enveloppes, les alimentations en eau, gaz inflammables, électriques...
	4.16	<u>Installations et maintenance</u> Ce chapitre décrit les instructions pour l'installation et la maintenance du système pile à combustible. Pour l'installation, ce chapitre s'attarde sur les risques d'erreurs lors de la fixation de pièce et le risque de rapport défectueux. Concernant la maintenance, il se focalise sur la localisation et les phases de réglage, de maintenance, de nettoyage...
<u>Partie 5 : Essais de types</u>		Cette partie expose les méthodes, les conditions et les types d'essais à mettre en œuvre. Il reprend les essais de fuite, de résistance, de surcharge électrique, d'arrêt, de fonctionnement et commande du brûleur, de températures, en soufflerie, ...
<u>Partie 6 : Essais individuels de série</u>		Cette partie reprend les essais à réaliser sur chaque unité de production en cas de production en série
<u>Partie 7 : Marquage, étiquetage et emballage</u>		Cette partie décrit le marquage des systèmes piles à combustible, des composants, la documentation technique à fournir par le fabricant (manuel d'installation, manuel d'information de l'utilisateur, manuel d'exploitation et manuel de maintenance)

Norme NFPA 853 :2015

Norme pour l'installation de systèmes piles à combustible stationnaires

La dernière édition de la norme NFPA 853 a été préparée par le comité technique de centrales électriques. Elle s'applique à la conception, à la construction et à l'installation des systèmes piles à combustible stationnaires.

Ce document spécifie les exigences pour prévenir et protéger un incendie dans les bâtiments et installations où sont déployés les systèmes piles à combustible stationnaires.

Le tableau suivant reprend un résumé du contenu des parties 5 à 9 qui portent sur les mesures de maîtrise des risques.

<p><u>Partie 5 :</u> <u>Implantation et connexions</u></p>	5.1	<p><u>Implantation générale</u></p> <p>Ce chapitre reprend les exigences quant à l'installation du système piles à combustible. Il est mentionné le choix de l'emplacement par rapport aux agressions externes d'origine naturelles (foudre, crue, séisme...), aux effets dominos, aux risques de malveillance, à l'accessibilité des utilités...</p>
	5.2-5.4	<p><u>Installations extérieures/ intérieures et situé sur le toit</u></p> <p>Ces chapitres spécifient les recommandations pour les installations en fonction de leur implantation. Il est notamment développé les préconisations concernant l'alimentation en air, la gestion des rejets, les barrières spécifiques concernant les compartiments comprenant les combustibles, les cas où sont nécessaires des portes et murs coupe-feu...</p>
	5.5	<p><u>Connexions avec les autres installations</u></p> <p>Ce chapitre détaille les exigences concernant les alimentations électriques et en substances inflammables.</p>
<p><u>Partie 6 :</u> <u>Alimentation en combustibles et dispositifs de stockage</u></p>	<p>Cette partie reprend les exigences concernant l'alimentation en gaz naturel, en GPL, en hydrogène, en biogaz, en combustibles liquides et solides.</p>	
<p><u>Partie 7</u> <u>Ventilation et le traitement des rejets</u></p>	<p>Cette partie détaille les exigences concernant les dispositions spécifiques du système de ventilation et de traitement de rejet. Il s'agit par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de prévenir l'arrivée ou l'accumulation de corps étrangers ; - d'extraire les rejets vers un endroit sécurisé ; - en cas d'utilisation d'une extraction métallique, d'asservir son fonctionnement à celui de la pile ; - de mettre en place un système de purge des installations contenant des gaz inflammables vers l'extérieur. 	
<p><u>Partie 8</u> <u>Protection contre l'incendie</u></p>	8.1	<p><u>Protection et détection incendie</u></p> <p>Cette partie spécifie les systèmes de protection à mettre en œuvre en cas d'incendie, les sites nécessitant une détection automatique et un système d'alarme, les exigences pour les transformateurs, les systèmes de commande et les installations en intérieur.</p>
	8.2	<p><u>Prévention incendie et plan d'urgence</u></p> <p>Ce chapitre détaille le contenu du plan d'urgence pour un système de pile à combustible.</p>

<p><u>Chapitre 9</u> <u>Pile à</u> <u>combustible de</u> <u>50 kW ou moins</u></p>	<p>Cette partie identifie les exigences additionnelles ou les modifications des précédents chapitres pour les systèmes de pile à combustible de 50 kW ou moins.</p>
--	---

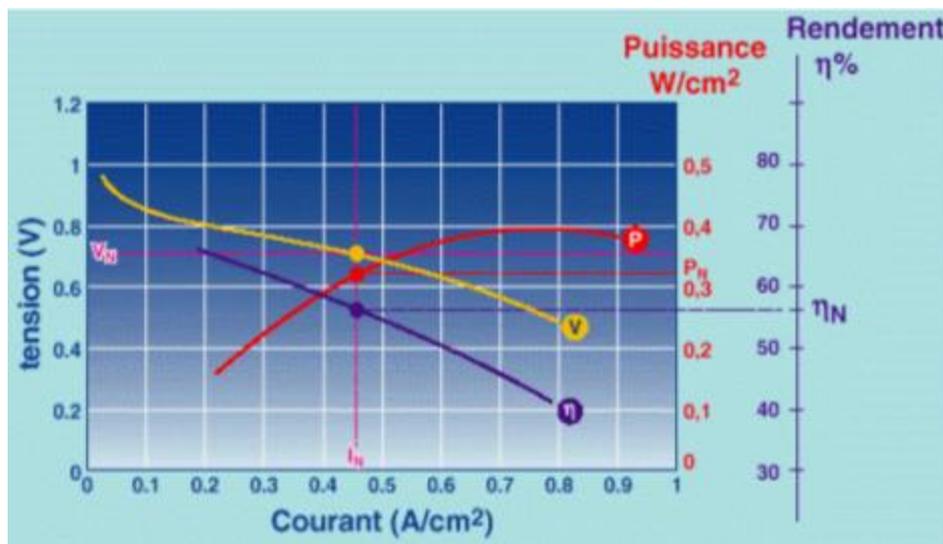
ANNEXE 8

PERFORMANCE DES PILES À COMBUSTIBLE

Performance des piles à combustible

Toutes les piles décrites dans ce rapport ont des caractéristiques électriques de fonctionnement similaires. Il a été choisi de s'arrêter sur ses paramètres de performance car ils permettent également d'identifier les défaillances de la pile et de décider au niveau du système de contrôle commande des actions adéquates. Ces défaillances seront détaillées dans la partie 5.

Les performances de la pile à combustible sont suivies par la courbe caractéristique V-I appelée courbe de polarisation. Une représentation en est donnée sur la courbe dans le cas de la pile PEM. Cette pile fonctionne généralement autour d'un point fixé par l'utilisateur (par exemple V_N , I_N , P_N , η_N).



Caractéristiques électriques de la pile PEM¹⁶

Le rendement global η , compte tenu des surtensions, c'est-à-dire des écarts par rapport au courant nul V_0 , s'exprime en tout point défini par la tension de cellule V , par la relation :

$$\eta = \eta_0 (V/V_0)$$

Avec $V_0 = 1,23$ V pour le couple H_2/O_2 et η_0 étant le rendement énergétique théorique.

La variation avec le courant est représentée par la courbe bleue, repérée η sur le schéma. La puissance P s'exprime par le produit $V \times I$: sa variation est représentée par la courbe rouge, repérée P sur le graphique.

Il faut noter que le point de fonctionnement nominal n'est pas au point de puissance maximum car le rendement est trop faible, de l'ordre de 40%. Le rendement nominal, généralement choisi par les constructeurs, avoisine les 55%.

ANNEXE 9

GLOSSAIRE ET DEFINITION

Glossaire et définition

AFC	Pile à combustible alcaline
AFHYPAC	Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible
AME	Assemblage entre la membrane et les électrodes (aussi abrégé)
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineer
Cellule unitaire	Élément constitué de deux électrodes emprisonnant l'électrolyte
CNPG	Centre National d'expertise des Professionnels de l'énergie Gaz
ERP	Établissement Recevant du Public
GDL	Couche de diffusion gazeuse
IEC	Commission Électrotechnique Internationale
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Ionomères	Polymères modifiés pour inclure des ions
MCFC	Pile à combustible à carbonate fondu
Module (stack)	Assemblage de plusieurs cellules
NFPA	National Fire protection Association
PAC (ou FC)	Pile à combustible ou fuel cell en langue anglaise
PAFC	Pile à combustible à acide phosphorique
PEMFC	Pile à combustible à membrane polymère
SOFC	Pile à combustible à oxyde solide
Système PAC	Le système inclut un module (ou des modules) et tous les périphériques, ou sous-systèmes, qui permettent au(x) module(s) de fonctionner et de délivrer la puissance électrique
UTE	Union Technique de l'Électricité

RÉFÉRENCES

- ¹ Site : <http://www.connaissancedesenergies.org> (16 janvier 2014)
- ² « Diagnostic & Health management of Fuel Cell Systems – A state of the art » - Presentation de Daniel Hissel, Ecole d'été internationale intitulée "From Diagnostics to Fault Tolerant Control of PEM Fuel Cell Systems", juillet 2016
- ³ Technology Roadmap-Hydrogen and Fuel Cell, OECD, IEA 2015
- ⁴ Site : <http://www.jobsinfuelcells.com/fctypes.htm>
- ⁵ Site : <http://fuelcelltoday.com/analysis/industry-review/2013/the-industry-review-2013>
- ⁶ Mémento de l'hydrogène, Fiche 9.3.1, Applications stationnaires de la pile à combustible dans le secteur industriel
- ⁷ Mémento de l'hydrogène, Fiche 9.3.2, Applications stationnaires de la pile à combustible dans le secteur résidentiel
- ⁸ Veille technologie et évaluation des risques sur les procédés de stockages hydrogène- Rapport d'étude Ineris DRA-13-125497-00405A
- Ignition Handbook: *Principles and applications to fire safety engineering, risk management and forensic science* Yvetnis Babrauskas
- Fiche toxicologique FT47 de l'INRS
- www.inchem.org
- Encyclopédie des gaz d'air Liquide
- ⁹ INERIS–DRC-09-103128-05616A – Émissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère – Seuils de toxicité aiguë pour le monoxyde de carbone (2009)
- ¹⁰ « Bipolar plates for PEM fuel cells a review », A. Hermann, T. Chaudhuri, P Spagnol, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 30, Sujet 12, 2005, pages 1297-1302
- ¹¹ « Simulation of the current density distribution for a PEMFC by using measured electrochemical and physical properties of the membrane, T. Araki, H. Koori, Y. Tanuichi , K. Onda, Journal of Power Sources, Volume 152, 2005, pages 60-66
- ¹² « Reducing arbitrary choices in model building for prognostics: an approach by applying parsimony on an evolving neuro-fuzzy system », M. El-Koujok, R. Gouriveau, N. Zerhouni., Microélectronics Reliability, Volume 51 (2), 2011, pages 310-320
- ¹³ Chapter 3 – electrochemical degradation: electrocatalyst and support durability, S. S. Kocha, Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation, Eds. Academic Press, 2012, pages 89-214
- ¹⁴ « Clefs CEA » n°44
- ¹⁵ La pile à combustible : un convertisseur d'énergie d'avenir, Laurent Antoni, Découvertes n° 344-345, 2007, pages 80-93
- ¹⁶ Mémento de l'hydrogène, Fiche 5.2.1, Les piles à combustible (PAC), AFHYPAC, 07/2016.
- ¹⁷ Site : <http://publish.illinois.edu/fuel-cells>
- ¹⁸ Mémento de l'hydrogène, Fiche 5.2.2, Les piles à combustible de type PEM, AFHYPAC, 06/2016.

-
- ¹⁹ Mémento de l'hydrogène, Fiche 5.2.6, La pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), AFHYPAC, 10/2014.
- ²⁰ Solid Oxide Fuel Cells, Eileen J. De Guire, 2013.
- ²¹ Mémento de l'hydrogène, Fiche 5.2.5, La pile SCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), AFHYPAC, 10/2014.
- ²² Mémento de l'hydrogène- Fiche 5.2.3, La pile AFC (Alkaline Fuel Cell), AFHYPAC, 10/2014.
- ²³ Pile à combustible et cogénération, T. Priem Techniques de l'ingénieur, Réf. D3360, 10/02/14.
- ²⁴ Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society: Proceedings of EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, M. Matsumoto, T. Umeda, K. Masui, S. Fukushige, Springer
- ²⁵ Technology Roadmap- hydrogen and fuel Cells-, International Energy Agency-IEA, 06/2015
- ²⁶ Pacific Northwest National Laboratory, 2013
- ²⁷ Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council, 2014; IEA AFC IA, 2014
- ²⁸ Business Case for a Micro Combined Heat and Power Fuel Cell System in Commercial Applications, Pacific Northwest National Laboratory (2013)
Strategic Roadmap for hydrogen Fuel Cells, Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council (2014), IEA AFC IA (2014), IEA AFC IA, Annex Meeting 25
- ²⁹Site :
<http://www.univers-nature.com/actualite/lheure-des-piles-a-combustible-residentielles-5938.html>



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aiaia
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>