



Etude de la filière hydrogène, état de l'art et applications possibles pour les systèmes énergétiques insulaires (8 mars au 25 juin 2004)

ROULET Francois Promotion STER 2004



HYDROGENE Île de La Réunion



ARER Sud - Siège Social

Adresse: 40 Avenue de Soweto - BP226 - 97456 Saint-Pierre Cedex

Tél.: 02 62 38 39 38 Fax.: 02 62 96 86 91 arer@arer.org



Licence STER 57, avenue d'Azereix - BP 1624 -65016 TARBES cedex Tel :05-62-44-42-04

e-mail: scolarite@iut-tarbes.fr

Etude de la filière hydrogène, état de l'art et applications possibles pour les systèmes énergétiques insulaires (8 mars au 25 juin 2004)

ROULET Francois étudiant en licence professionnelle « Sciences et Technologies des Energies Renouvelables » Promotion STER 2004



« Je crois qu'un jour l'eau servira de carburant, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble fourniront une source inépuisable d'énergie et de lumière, d'une intensité dont la houille ne saurait avoir »

Jules Verne « L'île mystérieuse » 1874

« Il n'y a pas de crise de l'énergie mais simplement une crise d'ignorance... »

Buckminster Fuller (1895-1983)

Résumé

"Filière hydrogène, état de l'art et application possibles pour les systèmes énergétiques insulaires"

Cette présente étude de recherche développement examinera l'état de l'art et les applications possibles pour la production d'électricité et de chaleur en milieu insulaire. Elle se déroulera en trois parties :

Une première partie consistera à la recherche de documents concernant les différentes technologies de la filière hydrogène, l'état des recherches dans le monde, et les applications auxquelles elles sont destinées. Une identification des sites et applications potentielles à priori sur l'île de la Réunion sera effectuée.

Une deuxième partie consistera à identifier et répertorier les différentes applications qui pourraient intégrer un générateur hydrogène sur l'île de la Réunion d'une façon détaillée et argumentée (flotte de bus captive, cogénération dans les bâtiments tertiaires, privés et collectifs, flotte de taxis, transport ferroviaire groupe électrogène de secours, Unité de puissance auxiliaire pour véhicules ...)

Une troisième partie consistera à identifier plus précisément un projet et évaluer les paramètres de sa faisabilité technique sur la perspective de 15 ans. Une restitution sera organisée à un rythme mensuel auprès du groupe de travail de la plate-forme PFRD, notamment entre chaque phase du stage. Deux cibles on été choisies, l'aéroport Roland Garros pour une application stationnaire et l'Îlet La Nouvelle pour un mini réseau décentralisé. Deux logiciels informatiques HOMER et VIPOR ont permis le dimensionnement des systèmes.

Abstract

"Hydrogen, state of the art and possible systems for producing energy on Réunion Island"

The subject of training joins in logic of research study development of the branch hydrogen from renewable energy in energy in The Réunion island environment, within the framework of the platform look for organized development and piloted by the ARER.

This research study development is decomposed into 4 subjects of training (Cf above). While working on his subject, the student will be brought to exchange information concerning 3 other subjects that deal with the production, with the stocking and with the exploitation of the hydrogen, with the aim of a stake in coherence of the various treated subjects.

A first part will consist in searching documents concerning the various technologies of the branch hydrogen, the state of the researches in the world and the applications for which they are intended. An identification of sites and potential applications in priori on the island of Reunion will

be established.

The second part will consist in identifying and in listing the various applications, which could integrate generator hydrogen in Reunion of a argued way (captive fleet of buses, cogeneration in buildings service industries, private and collective, fleet of taxis, railway transport generator of help, auxiliary power unit for vehicles)

The third part will consist in identifying more exactly a project and estimating the parameters of its technical feasibility on the perspective of 15 years. A restoration will be organized with a monthly rhythm with the workgroup of the platform PFRD, notably between every phase of the training. Two targets have been chosen, the airport Roland Garros for a still application and the ilet La Nouvelle for a mini decentralized network. Two computers HOMER software's and VIPOR allowed the dimensionnement of the systems.

Mots clés:

Hydrogène Energie renouvelable Pile à combustible Ile de la Réunion Electrification isolée Ilet la nouvelle Aéroport Roland Garros Stratégie énergétique

Remerciements

Je remercie l'Agence Régionale de l'Energie de la Réunion de m'avoir accueilli et particulièrement Monsieur RAT directeur de l'agence et maître de stage qui m'a accordé sa confiance et qui a su assurer un suivi régulier de mes travaux.

Messieurs PICOU, VADET, LEGROS, MAILLOT et ARABOUX pour leur aide concernant mes diverses questions et difficultés tant sur la forme que sur le fond du sujet étudié .

Je remercie également Mesdames Line FONTAINE et Sabine ROBERT, responsables de la gestion administrative et financière, pour leur disponibilité et leur accueil.

Je remercie les stagiaires de la plate forme recherche et développement pour la dynamique de travail en groupe qui a pu se réaliser.

Je remercie Messieurs PUJOL, MARINO, FAICAL et DELUSSAC, responsables de la licence STER à Tarbes, pour l'enseignement et l'encadrement qui m'ont permis de partir à la Réunion et de m'engager dans une voie professionnelle passionnante des énergies renouvelables.

Je remercie également Sylvie AUBRY pour son aide à la rédaction de ce rapport.

Et enfin, je remercie mes parents Sonia et Jean Bernard ROULET, ainsi que toute ma famille sans qui cette expérience réunionnaise n'aurait jamais pu être possible.

Sommaire

II. PRESENTATION ARER	XVII.	BIBLIOGRAPHIE	62
II. PRESENTATION ARER			
II. PRESENTATION ARER	2) 3) 4)	LES HYPOTHESES DE DEPART : DISCUSSION DES RESULTATS LIMITES DE L'ETUDE	52 54 59
II. PRESENTATION ARER			
II. PRESENTATION ARER	,		
III. PRESENTATION ARER. 1	2) 3) 4) 5)	PREMIER CALCUL SECOND CALCUL SYNOPTIQUE DE L'AEROPORT IMPLANTATION DU SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE	
III. PRESENTATION ARER		·	
III. PRESENTATION ARER	XIII.		
II. PRESENTATION ARER	,		
II. PRESENTATION ARER	XII.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PILES A COMBUSTIBLE	33
II. PRESENTATION ARER	2) 3) 4)	LES AVANTAGES DES VEHICULES PAC. LES PROTOTYPES. PRODUCTION DECENTRALISEE	28 29
II. PRESENTATION ARER	XI.	APPLICATIONS AUTOMOBILES	28
II. PRESENTATION ARER	,		
II. PRESENTATION ARER	2)	L'ELECTROLYTE	26
II. PRESENTATION ARER			
II. PRESENTATION ARER	VIII.		
II. PRESENTATION ARER	VII.		
II. PRESENTATION ARER	VI.	DIAGRAMME PERT-GANTT	18
II. PRESENTATION ARER	•	PROTOCOLE ARER	16
II. PRESENTATION ARER	V. G	GESTION DE PROJET	16
II. PRESENTATION ARER	•	La production d'electricite a La Reunion	13
II. PRESENTATION ARER1	IV.		
I. INTRODUCTION		NTRODUCTIONPRESENTATION ARER	

63
63
65
65
65
66
66
69
70
73

I. Introduction

L'île de la Réunion connaît un fort accroissement de sa consommation d'énergies fossiles et donc de sa dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Elle possède pourtant de forts potentiels en énergies renouvelables avec la géothermie, la bagasse, l'énergie des vagues, le solaire ... Dans le contexte géopolitique actuel et la libéralisation du marché de l'énergie, la Réunion développe une réelle volonté politique d'autonomie énergétique. Cependant, ses ressources renouvelables sont difficiles à exploiter. Elles sont diffuses, difficilement prévisibles, et stockables. L'hydrogène se présente donc comme un vecteur idéal qui pourrait accroître l'autonomie de l'île en complément de ses ressources renouvelables. Ainsi, l'ARER a décidé de lancer une série d'étude sur la filière hydrogène et sa faisabilité sur le sol réunionnais. Dans le cadre de mon stage diplômant pour une licence « sciences et technologies des énergies renouvelables », j'ai été recruté pour mener une étude sur le potentiel de l'hydrogène à la Réunion. J'ai donc été en charge de débuter l'étude de l'hydrogène au sein de l'ARER. Dans un premier temps j'ai du rassembler de la documentation et communiquer sur l'hydrogène au personnel de l'ARER. Puis, en concertation avec mon maître de stage, nous avons identifié deux cas d'étude bien distinct : l'aéroport Roland Garos et l'ilet La Nouvelle, ces deux cas permettent d'avoir une idée de la faisabilité et de l'intérêt de l'hydrogène comme vecteur des énergies renouvelables. Enfin, la présence de différents stagiaires travaillant sur l'hydrogène ainsi que la réelle volonté des dirigeants de l'ARER de faire perdurer leurs travaux a débouché sur la création de l'entité « groupe hydrogène ».



(Création Olivier MAILLOT)

II. Présentation ARER

L'ARER est une association loi 1901 financée en 2003 par la Région Réunion, EDF, l'ADEME, le CESR, le CCEE, le SIDELEC et la Commune de Saint-Leu, dont le but est de promouvoir les énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie sur l'île de La Réunion, notamment en valorisant les filières de formation.

Il s'agit de travailler sur des questions relatives aux énergies propres, énergies décentralisées utilisant des ressources locales d'énergie, ce qui pour une île n'est pas sans incidence déterminante, en matière de sécurisation de l'approvisionnement en énergie de l'île, en dépendance énergétique, en retombées financières locales, en création d'emplois locaux. Ces énergies renouvelables sont de véritables moteurs du développement durable de notre île. Ce sont aussi des énergies de la Paix, à l'orée d'une année 2004 où, une fois de plus, les acteurs des filières fossiles et nucléaires démontrent la limite de ces technologies pour assurer le devenir de la Terre et de ses habitants ...

L'une des missions de l'ARER est d'organiser une interface entre le développement des filières ENR, la formation, les stages, les écoles et les entreprises. L'ARER s'engage, en partenariat avec ses financeurs, à l'animation et au développement d'une plate forme stage - formation - action en Recherche & Développement appliquée dans le domaine des Energies Renouvelables et de la Maîtrise de l'Energie, en relation aux territoires insulaires et aux microclimats.

III. Présentation plate forme PFRD

La plate forme stage est emmenée en grande phase de travail individuelle par chaque stagiaire, en alternance avec des séminaires de travail collectif d'une journée, rassemblant les partenaires, l'ARER et les stagiaires. Ces séminaires marquent des étapes dans le développement des études : synthèse documentaire, annuaire des rencontres et enquêtes terrains à mener, phase diagnostic, phase propositions, et phase de rédaction finalisée.

En terme de méthode, alternent donc des phases de travaux personnels ou par petits groupes, et des phases de regroupement collectif pour se concerter, mettre au point et partager les sujets des autres, ensemble, dans des journées de séminaire. Cela dote les stagiaires d'une certaine culture des autres projets. Cette diversité est favorable à un véritable échange professionnel.

Les séminaires sont organisés par les stagiaires avec l'assistance de l'ARER. Chaque séminaire est assuré par un directeur d'évènementiel qui constitue son équipe au sein de la plate-forme RD, distribue les rôles (Téléchargement de la grille de tâches), et assure la bonne conduite globale de la journée de séminaire.

Les stagiaires sont par ailleurs tous appelés à jouer un rôle transversal sur la plate-forme stage RD : directeur d'évènementiel, interlocuteur global pour l'acquisition des données météo nécessaires à la plate-forme RD, gestionnaire qualité des documents informatiques et papiers remis par les stagiaires en fin de stage, accueil des stagiaires arrivants...

Le Groupe "hydrogène" est copiloté par deux référents techniques externes : Jacques MASSIAS en bénévolat, et Patrice GALBOIS par accord partenarial ARER - Stratégie Conseil Océan Indien

Ce sujet rattaché au groupe de travail hydrogène pour l'île de la réunion,

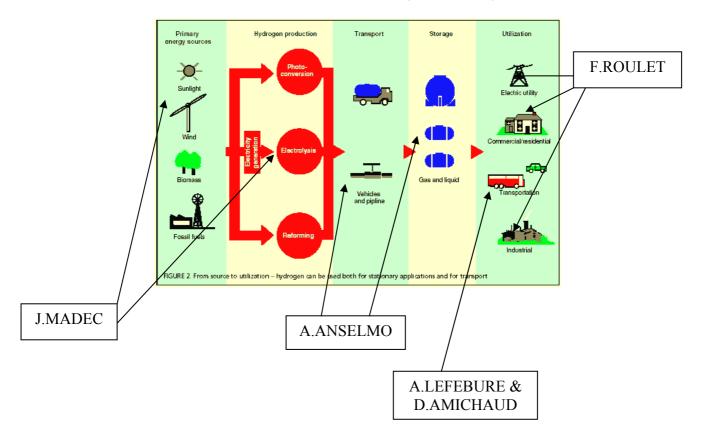
Filière hydrogène - Stockage et distribution de l'hydrogène en territoire insulaire (Alexandre ANSELMO, étudiant en Dess « politique de l'énergie »)

Filière hydrogène -, Production d'hydrogène et d'oxygène fondée sur l'électricité propre et renouvelable et l'électrolyse de l'eau en territoire insulaire (Julien MADEC ingénieur INSA Génie électrique, étudiant en Dess « politique de l'énergie »)

Filière hydrogène - Examen des conditions de mise en place d'un réseau de bus en flotte captive sur les quatre voies de l'île de la Réunion - Examen des inter modalités avec le TCSP et des funiculaires implantés sur les ensembles urbains de mi-pentes traversés par la route des tamarins (Anthony LEFEBURE élève ingénieur de l'ESTACA, Damien AMICHAUD élève ingénieur de l'école des Mines de Douai)

Le sujet de stage s'inscrit dans une logique d'étude de recherche développement de la filière hydrogène à partir d'énergie renouvelable en milieu insulaire réunionnais, dans le cadre de la plate-forme recherche développement organisée et pilotée par l'ARER. Cette étude de recherche développement est décomposée de 4 sujets de stage

Schémas résumant les points d'étude de la filière hydrogène par le groupe H2 de l'ARER



IV. Contexte énergétique réunionnais

L'île de La Réunion est située dans l'Océan Indien à environ 10 000km de l'Hexagone. Elle appartient à l'archipel des Mascareignes, au même titre que l'île Maurice, les Seychelles et Rodrigue. Sa capitale, Saint-Denis, se trouve au nord de l'île.

La Réunion, département français depuis 1946, est placée sous l'autorité du Préfet nommé par le gouvernement. Le Préfet est le garant des décisions gouvernementales et de la sécurité du territoire. Il est le représentant de l'Etat dans la Région et le Département. L'île jouit du même régime fiscal, administratif, électoral, judiciaire et social qu'un département de métropole. La seule originalité réside dans le fait que la région ne comptant qu'un seul département. le territoire d'influence du Conseil Général et celui du Conseil Régional sont strictement identiques .La France a été admise au sein de la Commission de l'Océan Indien (COI) en 1986, du fait de sa souveraineté sur La Réunion et sur Mayotte.

La Réunion à une économie de pays riche, le niveau de vie y est équivalent à celui des pays occidentaux développés. Mais, elle est cependant le département au revenu par habitant le plus bas de France, 7 320€ par an contre 12 900€ en métropole. En fait, l'île vit essentiellement des transferts de la métropole, comme presque tous les autres DOM-TOM. Le fonctionnariat et les minima sociaux constituent l'essentiel des revenus de la population, où 35% de la population est au chômage, soit 3 fois le taux de la métropole.

La Réunion est le département d'Outre Mer le plus peuplé avec 741 300 habitants au 1er janvier 2002 (source : *Tableau Economique de la Réunion 2002-2003*), dont 40% de moins de 25 ans. Les prévisions prévoient de dépasser le million d'habitants en 2025.



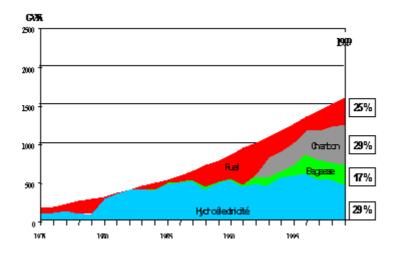


(Situation géographique de la Réunion)

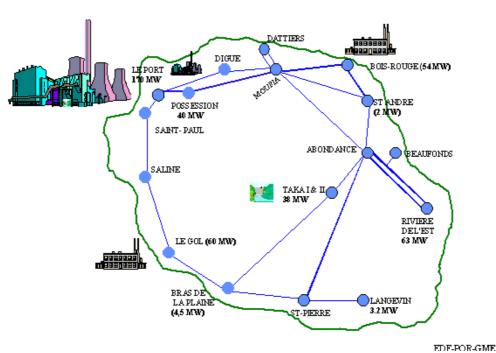
• La production d'électricité à La Réunion

La Réunion, de part son insularité, est obligée de produire sa propre électricité. Historiquement, cette production était assurée par l'hydroélectricité, puis est apparue la première centrale

thermique au fioul, puis des centrales à bagasse (résidu fibreux de l'industrie cannière). La part de bagasse a ensuite diminué pour laisser de plus en plus de place au charbon



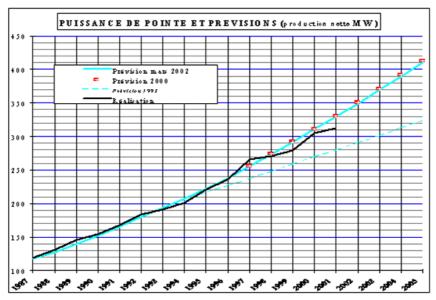
(Origine de l'énergie réunionnaise)



Carte des moyens de productions utilisés à La Réunion

La consommation d'électricité à la Réunion est en hausse régulière de 7 à 8 % par an. Cette augmentation, très rapide, s'explique par la forte croissance démographique et l'augmentation du taux d'équipement des ménages.

L'augmentation de l'appel de puissance est de 20 MW par an environ. La production devient problématique, autant à partir des énergies fossiles qu'à partir des énergies renouvelables.



Courbe de charge et scénarios

La forte croissance d'équipement en climatisation des bâtiments tertiaires et des logements a favorisé également cette croissance.

La consommation primaire d'énergie (CEP) de l'île s'établissait à 1 027 kilos tep ou ktep1 (1,002 millions de tonnes équivalent pétrole) en 2000 hors carburéacteurs (189 ktep), dont la consommation est pour l'essentiel imputable à la situation d'insularité de la Réunion, la demande intérieure d'énergie primaire de l'île est de 838 ktep. Cette demande est satisfaite à hauteur de 188 ktep par des ressources locales (hydraulique, bois, bagasse, et solaire thermique) et à hauteur de 666 ktep par des importations d'hydrocarbures et de charbon (respectivement 502 ktep et 164 ktep).

Le bilan primaire fait apparaît la prépondérance des énergies fossiles (produits pétroliers et charbon), et la très forte dépendance énergétique de l'île vis à vis des importations d'énergie (79%).

La répartition des consommations finales par énergie confirme le rôle prépondérant des hydrocarbures (64%) dans la satisfaction des besoins énergétiques finaux. L'électricité assure 22% des besoins. Les ressources énergétiques endogènes et renouvelables, à savoir le solaire et la biomasse, occupent une place tout à fait modeste dans la consommation énergétique finale (respectivement, 0,33% et 4%). Leur potentiel reste très largement sous exploité.

Du côté de la demande, la décennie 90 est marquée à la Réunion par une très nette accélération des consommations d'énergie : + 4,8% de taux de croissance annuel moyen pour la consommation d'énergie primaire et + 2,3% pour la consommation d'énergie finale. Soutenus par le dynamisme de la démographie (+20% sur la décennie), le secteur des transports avec l'explosion du parc automobile d'une part, et les secteurs résidentiel et tertiaire (développement des services, du logement, augmentation significative du pouvoir d'achat et corrélativement des taux d'équipement des ménages) d'autre part, sont les moteurs de cette croissance énergétique.

Le taux de croissance de la demande d'électricité est encore plus important : +8% par an sur la période 1990-2000 avec un bond de 43% sur la période 90-95 et un taux de 35% sur la période 95-00, comparés à ceux de la Métropole (où la demande d'électricité à été pourtant très fortement soutenue en raison des choix énergétiques nationaux), les taux de croissance de la demande d'électricité à la Réunion sont très largement supérieurs. Ils reflètent l'explosion des besoins

énergétiques associés au développement économique et en particulier à l'amélioration progressive du confort des populations (éclairage, TV et réfrigérateur dans les logements), au développement des équipements sociaux et culturels, aux services publics et marchands (grandes surfaces en particulier,) ainsi qu'à l'émergence de nouveaux besoins (Hi-Fi, lave-linge, climatisation, ...).

V. Gestion de projet

L'ARER recrute régulièrement des stagiaires pour effectuer un travail de recherche et développement, elle dispose donc d'une organisation et d'un protocole pré-établi pour le déroulement du stage. Celui-ci est découpé en 4 phases, chacune ayant un but bien précis et sanctionné par un compte rendu lors des journées de séminaire (une par mois. Ainsi, tout le personnel de l'ARER est au courant des avancées et des problèmes de chaque stagiaire.

Pour ma part, le déroulement du stage fixe par le protocole ARER ci-dessous a été respecté. Les phases de stage se sont enchaînées selon le plan initial prévu.

Protocole ARER

PHASE 1 / Recherche documentaire (papier et Web) et assemblage de synthèse (4 semaines) :

Sur la base du centre documentaire et du Web, chaque stagiaire, les 15 premiers jours, constituera sur le thème de son stage, et plus particulièrement sur le ou la filière technologique Energies Renouvelables (ENR) qu'il aura à intégrer :

- Constituer un document PowerPoint chapitré orienté sur les Technologies Energies Renouvelables (ENR) et Maîtrise de l'Energie (MDE) qu'il va focaliser à priori pour son projet comme suit :
 - les types de technologies et d'applications disponibles sur la planète terre,
 - la présentation des ressources réunionnaises,
 - les applications existantes à la Réunion,
 - les applications potentielles futures possibles.
- Etablissement d'un annuaire des acteurs à pressentir et d'un projet de courrier pour prise de rendez vous avec les acteurs concernés, listes des données à acquérir pour la phase diagnostic du stage, et information sur le stage concerné.
- Programme détaillé des étapes du stage et planning d'intervention.

JOURNÉE DE SÉMINAIRE ARER : échanges et discussions pour enrichir les rendus et formaliser le passage à l'étape suivante.

PHASE 2 / Enquête Diagnostic (4 semaines) :

Cette phase permet de rassembler et d'ordonnancer les éléments de la problématique et toutes

les données relatives au sujet étudié. Phase de rencontre des acteurs et de mise en équation de la problématique avec restitution des principaux axes de propositions et d'orientation. Les supports informatiques seront aussi mis en place pour le rendu des travaux de stage.

JOURNÉE DE SÉMINAIRE ARER : échanges et discussions pour enrichir les rendus et formaliser le passage à l'étape suivante

PHASE 3 / Orientation et Proposition - 4 semaines :

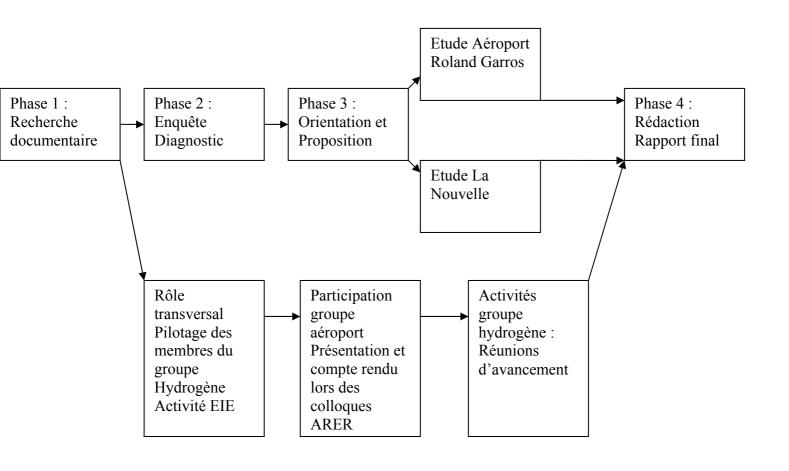
Sur la base de la phase 2 et des échanges du séminaire, le stagiaire pourra engager la phase proposition. Cette phase s'accompagnera d'un échange suivi avec les différents acteurs extérieurs à l'ARER concernés par le sujet de stage et avec l'équipe de l'ARER et de la plate forme RD

JOURNÉE DE SÉMINAIRE DE RESTITUTION GLOBALE DES TRAVAUX AUPRES DES PARTENAIRES et ACTEURS

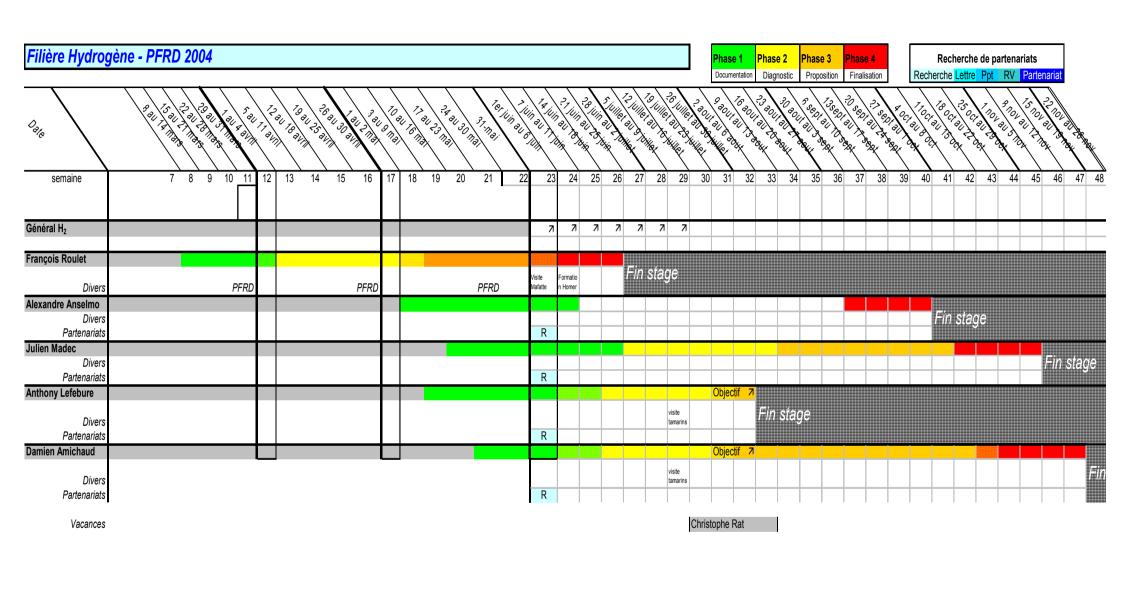
PHASE 4 / Finalisation rapport de stage global - 4 semaines :

Rapport technique - Annexes photos, tableurs, plans - Synthèse en français et en anglais des conclusions du rapport technique et orientations futures du projet - Page Web - Document PowerPoint de synthèse

VI. Diagramme PERT-Gantt



Lors de la réalisation de mes 4 phases successives de stage, j'ai du tenir un rôle « transversal » au sein de l'ARER, à savoir le pilotage d'un membre du groupe hydrogène encore en métropole, la participation aux réunions de travail sur l'aéroport Roland Garros, l'organisation d'une journée séminaire ,l'assistance téléphonique à l'espace info énergie, réunions d'avancement du groupe hydrogène ou sont prises des décisions de communication sur l'ARER et l'hydrogène : restitution des travaux devant les responsables de l'aéroport , élaboration d'un journal électronique sur l'hydrogène , un logo du groupe , un tee-shirt ...



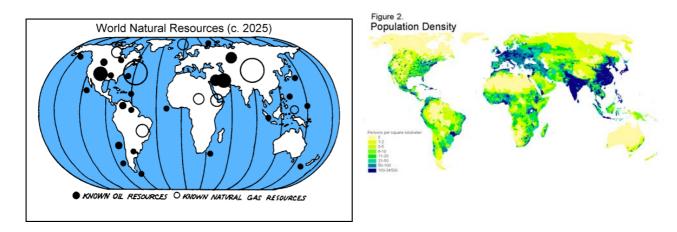
VII. Pourquoi l hydrogène

Notion de vecteur énergétique

Les piles à combustible ne sont pas une technologie nouvelle puisqu'elles ont été découvertes en 1839. Jusqu'au milieu de ce siècle, elles sont restées oubliées, jusqu'à ce que l'on s'y intéresse de programmes spatiaux années 1960. nouveau avec les des Depuis déhut des années 1990 elles suscitent nouvel intérêt lΘ un Désormais, de nombreuses entreprises développent des piles ou leurs composants ; des salons tournant autour de la pile et de l'hydrogène sont organisés régulièrement ; les centres de recherche, universités et gouvernements s'impliquent dans les projets de recherche et développement "piles à combustible" et enfin, des programmes sont mis en place pour les tester dans des applications quotidiennes: des bus à pile apparaissent dans les rues Européennes (programme CUTE) : le premier vient d'être lancé dans les rues de Madrid en mai 2003.

L'un des facteurs déterminants de cette évolution vient des problèmes climatiques et de la nécessité de réduire les émissions (notamment de CO_2). On recherche des moyens de production d'énergie moins polluants, notamment en accentuant la part du renouvelable. L'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% par rapport à 1990 d'ici 2008-2012.

Un autre facteur clef vient des réserves limitées en énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon). Ces énergies fossiles sont pour la plupart des pays industrialisés un facteur de dépendance énergétique important. Les tensions grandissantes avec le Moyen Orient et les problèmes connus avec le Venezuela début 2003 ne font que renforcer la nécessité de trouver une source d'énergie plus fiable.



La localisation des ressources fossiles et l'accroissement de la population mondiale risque d'entraîner de fortes tensions politiques comme en Irak ou en Tchétchénie.



L'accroissement de la population mondiale et l'industrialisation des pays en voie de développement vont entraîner à terme une augmentation des besoins énergétiques. Dans le domaine automobile, malgré les progrès des moteurs en terme de consommation, les besoins globaux en pétrole sont en augmentation du fait de la croissance du nombre des véhicules au niveau mondial et de l'augmentation des distances parcourues.

Il semble donc nécessaire de trouver une autre énergie à la fois renouvelable et moins polluante : ce pourrait être l'hydrogène. Celui-ci est le combustible idéal des piles à combustible, et peut être utilisé dans d'autres applications. Cependant, l'infrastructure adéquate (production, transport, stockage) devra être mise en place pour qu'un tel carburant puisse avoir sa place, car il n'existe pas à l'état naturel, à la différence du pétrole et autres gaz naturels.

Electrolyse

On parle souvent de l'électrolyse liée à l'utilisation des énergies renouvelables. Cela serait intéressant dans la mesure où la production d'électricité par ce moyen n'est pas vraiment simultanée aux besoins. L'autre possibilité est d'utiliser l'électricité produite par des centrales nucléaires (notamment pendant les heures creuses). L'hydrogène permettrait de stocker l'électricité sous forme chimique et de réutiliser plus tard l'hydrogène. L'efficacité de l'électrolyse approche 65%, quoiqu'en théorie on puisse atteindre 80 ou 85%, mais son coût est bien supérieur à celui du reformage en raison du coût de l'électricité. Pour que le procédé soit rentable, il faut une électricité à faible coût. Mais, l'intérêt est la production sur place supprimant tout problème de transport.

Réaction

Si on considère la réaction, elle est le contraire de celle qui se passe dans la pile. Il faut de l'eau très pure (dé ionisée) pour éviter que les impuretés perturbent le fonctionnement de l'électrolyse. Typiquement, la cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (cathode et anode), d'un électrolyte et un générateur de courant. L'électrolyte peut être une membrane polymère échangeuse de protons (du type de celles utilisées pour les PEMFC) ou une membrane céramique conductrice d'ions oxygène.

Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, on a les réactions suivantes: A l'anode : l'eau se dissocie en oxygène et en protons. Les électrons partent dans le circuit.

$${
m H_2O}\,
ightarrow 2\,{
m H^+} + 2\,{
m e} - + {1\over 2}\,{
m O_2}$$

A la cathode : les protons, passés à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène.

$$2\,\mathrm{H^+}$$
 + $2\,\mathrm{e}$ - \rightarrow $\mathrm{H_2}$

Ces réactions sont l'inverse de celles de la pile. Sous apport du courant, l'eau est dissociée en hydrogène et oxygène. Il est nécessaire d'apporter de l'énergie électrique puisque l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285kJ/mole. Cela correspond à un potentiel théorique de 1.481 V à 25°C, mais en pratique on a plutôt des potentiels entre 1.7 à 2.3 V (correspondant aux rendements cités ci dessus). Des données concernant des électrolyseurs industriels donnent les indications

suivantes : pour une température de 80°C et une pression de 15 bars, on a besoin d'environ 4,5 kWe pour produire 1Nm3 d'hydrogène.

Actuellement, des électrolyseurs d'une puissance de 1 à 100 kW sont développés. Pour que cette technologie soit valable, il sera nécessaire de faire une analyse à la fois économique mais aussi énergétique et environnementale portant sur tout le cycle de vie, et ce pour évaluer les coûts de production de l'hydrogène et l'impact sur l'environnement. Ces résultats dépendront largement du type d'électricité utilisée et de son coût.

Energie solaire

On distingue dans l'énergie solaire le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Le premier n'est pas intéressant dans l'optique qui nous intéresse (trop bas niveau de température pour le thermique classique, cher dans le cas du thermique "haute température"). En revanche, le photovoltaïque permet de produire de l'électricité. Cette technique dépend encore des progrès technologiques et de diminution de coût à faire dans la fabrication des cellules.

Energie éolienne

L'énergie éolienne est actuellement en plein développement en Europe: en Allemagne, en France... L'Allemagne est largement en tête en Europe avec 12 GW installés début 2003 (environ la moitié de la capacité en Europe). Les plus grosses éoliennes ont une puissance autour de 1 à 2,5 MW. Des systèmes ont été proposés qui conjuguent une éolienne alimentant des habitations en électricité, fabricant de l'hydrogène par électrolyse quand la production est supérieure à la demande et alimentant le village en électricité générée par une pile dans le cas inverse.

Hydraulique

L'hydraulique est l'énergie renouvelable la plus économique, mais tous les pays ne sont pas égaux. En France, elle représente environ 17% de l'électricité produite, mais cette capacité arrive à saturation. En revanche, d'immenses réserves existent en Amérique du Sud et en Asie. Une chose est néanmoins à prendre en compte avec l'utilisation des énergies renouvelables: c'est la quantité d'énergie qu'on doit utiliser pour produire cet hydrogène ainsi que le rendement global comparé à celui de méthodes de production d'électricité comparables.. Autre facteur à prendre en compte: les émissions de gaz à effet de serre

Biomasse

La biomasse peut aussi permettre de produire de l'hydrogène, mais aucun procédé n'est encore mûr techniquement. On peut penser à la biomasse pour produire de l'électricité qui permettra ensuite de produire l'hydrogène par électrolyse. Plusieurs méthodes existent actuellement:
- transformation en alcool (éthanol, méthanol) ou méthane suivi de reformage.

- pyrolyse et gazéification de la biomasse suivi de reformage,

La fermentation de la biomasse permet de produire une solution alcoolisée, dont on pourra ensuite obtenir après distillation du méthanol ou de l'éthanol. Un autre type de fermentation (anaérobie) permet d'obtenir du biogaz contenant essentiellement du méthane et du CO2. Ceux ci être reformés suivant procédés peuvent ensuite les VUS dessus Dans le cas de la gazéification de la biomasse, on va d'abord faire sécher la biomasse, puis la thermolyser à 600°C. On la fait réagir vers 1 000°C avec de l'air ou de l'eau (reformage), enfin on élimine les impuretés. De là, on obtient un gaz riche en H2 et CO, que l'on peut utiliser directement pour produire de l'électricité, purifier pour en extraire H2, ou transformer en méthanol. C'est un procédé dont la mise au point pourrait mettre encore 5 à 8 ans.

Algues vertes et bactéries

Une autre possibilité réside dans les algues vertes. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène sera combiné au CO2 pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. Ce type de procédé pourrait être au point techniquement d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans.

VIII. Pile à combustible

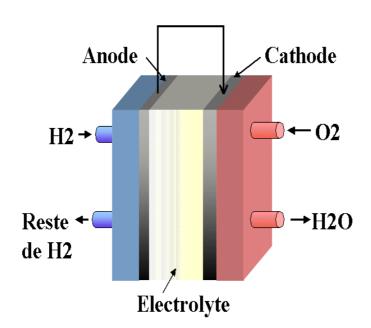
Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. A la différence des moyens traditionnels de production de l'énergie, son rendement ne dépend pas du cycle de Carnot. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles (pile au Zinc). On peut ainsi obtenir du courant de façon continue.

L'un des intérêts de la pile à combustible est que les températures sont d'un plus faible niveau que dans les turbines ou les moteurs à combustion. Ceci permet entre autres d'éviter la formation de NOx. Cependant à ce niveau de température, la plupart des carburants carbonés traditionnels sont trop peu réactifs et seul l'hydrogène convient. Le méthanol peut aussi être utilisé dans les piles directes à méthanol, mais leurs performances restent pour le moment inférieures à celles des piles à hydrogène. Pour utiliser des combustibles type méthane ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées: 800 à 1 000°C. La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique: on préfère donc utiliser de l'hydrogène.

Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments:

- deux électrodes,
- un électrolyte

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichie ou non en oxygène).



IX. Principe élémentaire d'une pile

1) Les réactions

Dans le cas d'une pile hydrogène-oxygène, on a oxydation de l'hydrogène à l'anode selon:

$$H_2 \longrightarrow 2 H^+ + 2 e^-$$
 électrolyte acide
 $H_2 + 2 OH^- \longrightarrow 2 H_2 O + 2 e^-$ électrolyte basique

Il s'agit d'une réaction catalysée. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

A la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon:

$$1/2 O_2 + 2 H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$$
 électrolyte acide
 $1/2 O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2 OH^-$ électrolyte basique

Le bilan donne donc:

$$H_2 + 1/2 O_2 \longrightarrow H_2O + chaleur$$

Cette réaction est exothermique: à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse. Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V. Cette tension dépend aussi de la température.

Les catalyseurs

Du côté anode

Pour les piles de basse et moyenne température on utilise des métaux précieux : platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme de particules de faibles tailles (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe. Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du réformage : on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance.

Du côté cathode,

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

2) <u>L'électrolyte</u>

L'électrolyte varie en fonction du type de pile: KOH pour les piles AFC, membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC ou les DMFC, acide phosphorique pour les PAFC, carbonates fondus pour les MCFC et oxydes solides pour les SOFC. Il permet que les espèces ioniques (et pas les électrons) transitent de l'anode vers la cathode. Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile. Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques, leurs propriétés mécaniques. A cela s'ajoutent d'autres contraintes selon le type de pile, le niveau de la température, les composants des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression.

3) Les plaques bipolaires

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont elles aussi plusieurs rôles:

- canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- collecter le courant,
- gérer les flux d'eau.

Généralement en graphite, ces plaques doivent être conductrices du courant, mais aussi permettre une diffusion homogène des gaz jusqu'aux électrodes ainsi qu'intervenir dans la gestion de l'eau à évacuer ou à apporter pour humidifier (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent être résistantes aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant.

A ces composants essentiels qui forment le cœur de la pile s'ajouteront ensuite les auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement. Il s'agit des réservoirs pour le carburant et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des pompes pour le carburant et l'eau, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile, de l'onduleur pour transformer le courant continu en sortie de pile.

X. Technologie des différentes piles à combustible

Applications possibles

On compte actuellement <u>6 types de pile à combustible</u>:

- AFC (Alkaline fuel Cell),
- PEMFC (Polymer Exchange Membran Fuel Cell),
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell),

- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*),
- MCFC (Molten carbonate Fuel Cell),
- SOFC (Solid Oxid Fuel Cell).

Ces piles se différencient selon la nature de leur électrolyte, et de là, par le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Par ailleurs, chaque pile a des exigences différentes en terme de combustibles. Les domaines d'application pour les piles sont les suivants:

- les applications portables,
- les applications spatiales,
- les applications sous marines,
- les groupes de secours,
- les applications automobiles (voiture et bus),
- la cogénération (industrielle ou groupements d'habitations),
- la production centralisée d'électricité

Ci-dessous, sont données les caractéristiques de tous les types de piles.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkalin Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxyd Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
lons dans l'électrolyte	OH-	H ⁺	H⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydants	0 ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime (?)	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU), Maritime (?)
Niveau de développement	Utilisée	Prototypes	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

XI. Applications automobiles

Face à l'augmentation du prix du pétrole et à l'aggravation des problèmes climatiques, il semble nécessaire de trouver des alternatives, que ce soit les véhicules hybrides ou les véhicules électriques, voire des véhicules roulants avec des carburants alternatifs.

On distingue deux applications des piles dans le domaine de l'automobile : la propulsion du véhicule et l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques, confort), avec ce qu'on appelle une APU (Auxiliairy Power unit). La pile à combustible utilisée pour la propulsion sera la PEMFC : elle seule satisfait aux critères de rapidité de mise en route, de niveau de température

1) Le carburant

L'hydrogène est par définition le meilleur pour alimenter la pile à combustible. Pour le moment, il ne peut être stocké que sous forme gazeuse (haute pression: de 300 à 700 bars) ou liquide (à - 253°C). Mais ces formes de stockage sont insuffisantes en termes de densité gravimétrique et volumétrique. D'autres technologies sont à l'étude: les hydrures métalliques, les nanotubes...

L'utilisation de l'hydrogène nécessite dans tous les cas la mise en place de l'infrastructure de production, de transport et de distribution avec par exemple des stations service .

2) Les avantages des véhicules PAC

Les véhicules fonctionnant à l'hydrogène ne rejettent que de l'eau; ce sont des véhicules "Zéro Emission" (ZEV). Néanmoins, on ne peut considérer la voiture seule, il faut aussi considérer la fabrication du carburant. On distingue ainsi les émissions du puit au réservoir (WTT) et celles du réservoir à la roue (TTW). Pour une voiture à l'hydrogène, les émissions TTW sont presque nulles.

En revanche, ceux fonctionnant avec un reformeur devraient avoir des émissions de CO, particules, NOx inférieures à celles des véhicules traditionnels, mais non nulles. Quand on calcule ces émissions sur un bilan complet avec toutes les étapes du "puit à la roue", on obtient un large spectre où les véhicules à hydrogène ne sont pas toujours gagnants. Tous ces bilans sont à prendre avec une extrême précaution car les calculs faits dépendent énormément des chaînes de production choisies.

Malgré les importants travaux réalisés sur ces véhicules, il reste encore de nombreux progrès à faire en termes de coût, de place, de poids et de performances atteintes par le système. A ceci s'ajoute celui de la production, du transport et du stockage de l'hydrogène, et éventuellement choix du carburant de transition.

Dans les premières années, peu de véhicules seront produits : il s'agira de flottes captives plutôt destinées à des entreprises, des taxis avec un rayon de déplacement limité. Il semble bien qu'ils puissent tenir leurs promesses : fin 2002, Toyota a livré ses premiers véhicules FCHV dans des Universités américaines (Davis et Irvine) et Honda a livré une FCX à la mairie de Los Angeles.

3) Les prototypes

Au cours des dix dernières années, les constructeurs automobiles ont développé de nombreux prototypes; le plus avancé d'entre eux est sans doute DaimlerChrysler avec ses NECAR, avec les constructeurs japonais Honda et Toyota. Cependant, d'autres constructeurs automobiles sont également sur les rangs : General motors, Opel, Ford, Nissan et en France, Renault et PSA.

En Mars 2003, des piles à combustible pour portables ont été présentées à un salon pour l'informatique à Hannovre. Une des premières occasions pour les piles de se montrer hors des salons spécialisés. Toshiba, Masterflex et Smart Fuel Cell ont présenté leurs prototypes au public.

Les piles à combustible peuvent être de toutes les tailles grâce à leur modularité : de moins d'1 Watt à plusieurs MW, ce qui permet la création de piles de très petite taille ne comportant que quelques cellules et ayant une petite surface. Les piles de petite taille ont en effet de réelles chances dans un marché d'appareils électroniques en constante croissance: téléphones portables, ordinateurs, caméscopes, agendas électroniques.

Quel type de piles?

Parmi les différents types de piles, deux seulement sont susceptibles d'avoir des applications portables : il s'agit des PEMFC et DMFC. Ces deux piles sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement : entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante. Le principal défi est la miniaturisation des piles : du point de vue architecture, la micro pile devra donc soit être une version réduite des PEMFC et DMFC actuellement développées, soit être radicalement différente.

La première solution semble a priori la plus simple, mais la miniaturisation devrait avoir des limites. En effet, les PEMFC et DMFC de plus faible puissance utilisées dans d'autres applications (cogénération domestique) sont de l'ordre d'1 kW. Créer des micro piles passe par la miniaturisation de tous les composants (pile, pompe, échangeurs, convertisseur de courant) ainsi que par la gestion des flux de chaleur et d'eau qui sont traditionnellement l'une des difficultés majeures de ce type de pile. D'autant qu'entre l'état de veille et celui de fonctionnement actif, il y a une notable différence de puissance donc, il faut gérer une demande brusque de puissance et donc, de combustible avec tous les flux que cela entraîne. A ceci s'ajoute le problème du combustible, le méthanol étant corrosif et aucune méthode de stockage satisfaisante n'ayant été trouvée pour l'hydrogène. Si un autre combustible devait être utilisé, il faudrait alors en plus un micro reformeur.

Autre problème: le carburant. Il est hors de question d'utiliser de l'hydrogène liquide ou gazeux pour des questions de sécurité. Une solution est d'utiliser du méthanol ou bien de produire de l'hydrogène à partir de borhydrure de sodium NaBH4.

Marchés et Concurrents

Le marché des appareils électroniques portables est en continuelle expansion : il ne concerne pas seulement les ordinateurs portables, les téléphones ou les assistants de poche, mais aussi tous les jeux de poche, les systèmes d'alarme, des appareils de camping, à usage militaire, voire des appareils individuels de santé. Ce qui représente déjà; un certain spectre de puissance. Un téléphone portable consomme en moyenne 1 W en conversation, et 50 mW en veille. Un

ordinateur portable a besoin d'environ 10 W. Aux attentes en termes de puissance et de prix, s'ajoutent la nécessité de pouvoir recharger ces appareils de façon simple et rapide et surtout de leur assurer une autonomie plus importante que celle qu'ils ont actuellement. D'autant que la consommation de ces appareils risque d'augmenter dans les années à venir avec la multiplication des fonctionnalités.



Ordinateur alimenté par une pile Ballard

Bateaux...

Il existe un certain nombre de projets en cours, que ce soit pour la marine civile ou militaire. Parmi les premiers projets à voir le jour, on peut citer les travaux faits par l'EIVD (Ecole d'Ingénieurs du canton de Vaud) qui a réalisé dès 1998 l'Hydroxy 100, un petit bateau monoplace mû par une pile PEMFC de 100 W. Depuis, d'autres prototypes ont suivi : l'Hydroxy300 (pile de 300 W) et bientôt l'Hydroxy3000.

En 2002, un bateau de la course du Rhum piloté par Roger Langevin embarque à son bord une pile à combustible. L'EIVD et Alca Torda sont notamment partenaires de l'opération.

On peut citer le projet pilote européen FC Ship visant à évaluer l'insertion de PAC dans les navires de la marine marchande.

Du côté américain, un petit bateau taxi développé par Millennium Cell, Seaworthy Systems et Duffy Electric Boat Company sera lancé début Août en Californie (Newport Beach). Le système de pile de 6 kW est fabriqué par Anuvu Fuel Cell Products, et doit fonctionner à l'hydrogène fabriqué grâce au système de Millenium Cell. Il s'agit d'un bateau pour 22 personnes qui devrait fonctionner 10 à 12 heures par jour.

Sous marins

Siemens s'intéresse particulièrement aux applications des piles dans les sous marins. Siemens a même lancé son premier en 1984, cependant, il s'agissait d'une AFC de 100 kW, tandis que les nouveaux systèmes fonctionnent avec des PEM. En 2002, Siemens a lancé en partenariat avec HDW un sous marin - dit de classe 212 - avec une pile de 250 kW destiné à la marine allemande. Son nom est U31 et il a été baptisé en Mars 2002 et devrait être lancé en 2004. Il comprend 9 PEM d'une puissance de 30 à 50 kW et fonctionne à l'hydrogène et l'oxygène. 4 autres sous marins de ce type ont déjà été commandés, par la marine allemande, ainsi que 2 pour la marine italienne. D'autres prototypes plus élaborés - du nom de U214 - sont aussi en construction. 3 sont destinés à la marine grecque et 3 à la marine sud coréenne.

Les applications stationnaires sont les plus diversifiées parmi les applications des piles: cela tient à plusieurs choses:

- un large spectre de puissance du kW à plusieurs MW,
- des applications allant de l'approvisionnement d'électricité à la cogénération en passant par la génération de vapeur ou de froid,
- divers types de piles possibles,
- plus de possibilités au niveau des carburants

On peut distinguer la production décentralisée - avec en particulier les applications stationnaires de faible puissance (résidentiel, secours...) ainsi que la cogénération de moyenne puissance (quelques centaines de kW) - et la production centralisée d'électricité sans valorisation de la chaleur.

Désormais, ce sont les autres types de pile, MCFC, SOFC et PEMFC, qui sont à l'étude et qui pourraient avoir une part croissante dans le marché stationnaire: on distinguera néanmoins - les piles haute température SOFC et MCFC pouvant servir à produire une chaleur à un niveau entre 40 et 200 voire 700°C et dont les applications vont du résidentiel (pour les SOFC) à l'industrie et à la production centralisée de courant, - des PEMFC dont la chaleur ne pourra pas dépasser les 70°C et qui sera plutôt utilisée pour des applications domestiques (eau chaude, chauffage) et des PAFC limitées à 160°C. Si les PAFC et PEMFC peuvent dans les premiers temps s'imposer sur ce marché, les SOFC (et MCFC) pourraient ensuite les supplanter.

Au niveau des puissances de ces piles, on trouve:

- des petites piles PEMFC et SOFC de quelques kW pour les résidences,
- des systèmes plus importants (100, 200, 250 kW) avec les trois types de piles,
- des plus grosses installations de cogénérations (supérieures à 1 MW) qui ont plutôt été réalisées avec des SOFC et MCFC.
- des installations de puissance de l'ordre de 1 MW combinant une pile haute température (SOFC et MCFC) avec une turbine pour produire de l'électricité.

Autre différence de taille entre les SOFC (et MCFC) et leurs concurrentes les PEMFC: les premières peuvent utiliser directement *divers combustibles*, du gaz naturel aux hydrocarbures liquides, biomasse et charbon gazéifié et le reformage peut avoir lieu en interne alors que les PEMFC acceptent un choix plus restreint de combustibles et le reformage doit être fait hors de la pile dans un appareil séparé. Dans les premiers temps, le gaz naturel sera le combustible privilégié.

4) Production décentralisée

Depuis plus d'un an, on voit de nombreuses piles de faible puissance apparaître et être placées en test dans des habitations, sites isolés, bâtiments administratifs, ...Ces applications stationnaires mettant en jeu soit un apport exclusif d'électricité (systèmes de secours ou de sécurité), soit de la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) sont l'une des possibilités qui pourrait le plus vite déboucher sur le marché. Les puissances types sont de l'ordre du kW.

Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance de l'ordre de quelques centaines de kW ont été installés aux USA, au Japon et en Europe. Il s'agit là en général de cogénération pour alimenter des sites industriels ou des réseaux de chaleur. Les unités de plus d' 1 MW restent encore rares à l'heure actuelle.

Quel marché?

lе marché stationnaire décentralisé est relativement puisqu'il vaste - des applications domestiques pour un particulier ou un secteur résidentiel avec chauffage central collectif (l'électricité mais aussi la chaleur produite par ce dispositif sont compatibles aux besoins d'une maison: chauffage. eau chaude. piscine ou réfrigération) industrie aux applications industrielles en moyenne pour - en passant par le secteur tertiaire pour des bâtiments spécifiques type administratifs, hôpitaux, piscines, maisons de retraite. centres commerciaux... - et enfin les applications de secours ou de sécurité servant à alimenter des systèmes sensibles (banque..).

Dans un marché en constant changement (ouverture à la concurrence) et face à une demande croissante en électricité, les piles à combustible représentent des sources de production d'énergie délocalisée très intéressantes. Elles peuvent constituer une solution dans le cas de *lieux isolés* où il est difficile ou même coûteux d'installer des lignes électriques (site classé, montagne ...). Les piles à combustible pourraient assurer une distribution fiable et indépendante des intempéries et même permettre une économie dans le coût de transport et d'installation. Ce n'est peut être pas aussi vrai en France dont la production d'électricité est plus tournée vers le nucléaire et donc centralisée, mais d'autres pays se tournent vers d'autres choix. Des pays aussi gigantesques que les Etats Unis ont besoin de production délocalisée. En France, depuis 2003, EDF teste une pile d'Idatech couplée avec des panneaux solaires alimentée au méthanol tandis que GdF a installé 5 piles de HPower alimentées au gaz naturel.

Une autre application pour laquelle la pile est particulièrement indiquée est les systèmes de secours ou de sécurité requérant une grande fiabilité. Cela peut être le cas par exemple pour une banque ou des systèmes informatiques requérant une grande disponibilité.

La pile à combustible se révèle intéressante pour les besoins simultanés en électricité et en chaleur, voir en froid puisque à la fois chaleur et électricité sont produites par les piles. Mais on peut aussi envisager des demandes soit uniquement en électricité ou en chaleur ou distinguer selon que les besoins dominants seront en électricité ou en chaleur. Les deux étant produits par une pile (dans un ratio dépendant du type de pile), il est possible de revendre la chaleur et consommer l'électricité (ou inversement), consommer les deux ou bien consommer une partie de la chaleur et de l'électricité produites et revendre le surplus à un tarif convenu avec un fournisseur d'énergie.

La pile à combustible offre un meilleur rapport électricité - chaleur que ces concurrents dans le domaine (moteurs, micro turbines...). Cependant, les coûts sont encore bien trop élevés pour que les piles puissent actuellement avoir une pénétration conséquente dans le marché stationnaire leurs concurrents ont des coûts de revient beaucoup plus car bas. Les coûts d'investissement se situent actuellement entre 3500 et 10000 Euro/kW (pile, auxiliaires et production d'hydrogène) et on estime qu'ils devraient passer à moins de 1000 Euro/kW. Les coûts de maintenance ainsi que la durée de vie des stacks et des auxiliaires restent encore des inconnues.

Il faut tenir compte de la possibilité ou non de revendre le surplus d'électricité au réseau, et à quel prix.

A ces difficultés d'ordre économique, s'ajoutent les problèmes purement technologiques tel que leur durée de vie, l'empoisonnement du catalyseur, leur faire réaliser plusieurs cycles départ/arrêt successifs sans dommages...

Quant au bilan environnemental, il semble globalement favorable aux piles à combustible: les émissions de CO2 et de NOx seraient inférieures à celles de leurs concurrentes.

5) Production centralisée

Parmi les types de production d'électricité, on peut trouver pour les piles différents types d'application: les applications de secours, la production d'appoint reliée ou non au réseau ou une production centralisée d'électricité.

Les piles à combustible dépassent rarement la taille d'1 MW, cependant des études sont faites sur des centrales de plusieurs centaines de MW. Celles-ci pourraient ainsi remplacer les centrales thermiques trop polluantes. Cependant seules les piles "haute température", c'est à dire les MCFC et SOFC sont adaptées à de telles applications: on peut en effet leur adjoindre une turbine à vapeur ou à gaz (voire les deux derrière une SOFC), et ainsi produire de l'électricité avec un rendement très élevé: des rendements de plus de 70% sont annoncés.

De même que les installations de cogénération, ces systèmes peuvent servir à la production décentralisée d'électricité. De construction modulaire, avec des faibles nuisances sonores, ces installations peuvent être placées près des utilisateurs.

XII. Avantages et inconvénients des piles à combustible

1) Avantages des piles

- de hauts rendements énergétiques même à charge partielle,
- de faibles émissions sonores,
- peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé),
- elles sont de construction modulaire,
- diverses températures de fonctionnement (PEMFC),
- pas de parties rotatives.

Un haut rendement énergétique

Le rendement électrique net électrique dépend du type de pile, il varie entre 40 et 70%. Il faut cependant tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur...), du fonctionnement sous pression ou de la sur stœchiométrie en carburant et en air qui font baisser cette valeur. Une spécificité des piles est que le rendement électrique ne diminue pas et même augmente à charge partielle. Ce rendement ne diminue donc pas dans le cas de petites installations, à la différence des installations conventionnelles (turbines à gaz) où les petites unités de quelques kW ont de faibles rendements. Le rendement chute à très faible charge en raison de la consommation des accessoires.

En ce qui concerne les véhicules automobiles, on ne peut considérer le seul rendement du système pile: il faut comparer les véhicules avec des bilans du "puit à la roue" en comptabilisant la transformation du carburant (extraction, transport, procédés de raffinage, transport et distribution). Les chiffres donnés sont souvent issus de simulations faites avec des modèles de véhicules sur un parcours type (parcours européen). - Le rendement d'un moteur thermique (du réservoir à la roue) se situe entre 21 et 24% (essence ou diesel), ces rendements étant susceptibles d'être améliorés (23 à 27%) - Le rendement d'une PEMFC varie de 33% (reformage de l'essence), à 38 % (reformage du méthanol) et jusque 50% (hydrogène gazeux). En considérant en plus le moteur électrique, on obtient un rendement du réservoir à la roue variant de 22 à 33% selon le carburant.

Pour les applications stationnaires, on doit considérer le rendement énergétique global, qui est bien plus élevé: l'énergie qui ne passe pas sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. La valorisation de cette chaleur dépend alors du niveau de température de la pile, mais on peut atteindre des rendements globaux de 85 à 90%.

Silencieuses

Lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses: dans les systèmes PAC, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation produisent un léger bruit. Les émissions sonores de la pile ONSI PC25 sont de 58dB à 10m.

Emissions limitées

On cite les piles à combustible comme atout dans la lutte contre la pollution, en particulier la limitation des gaz à effet de serre définie par la Conférence de Kyoto. Les émissions produites par un système pile dépendent étroitement du carburant utilisé et de son origine.

Les émissions à considérer sont:

- les gaz à effet de serre, en particulier le CO2, le CH4,
- le CO
- les NOx (oxydes d'azote),
- les particules carbonées,
- le S02,
- les poussières.

En matière de propulsion automobile, une classification a été faite selon leurs émissions: ZEV: Zero Emissions Vehicles, SULEV: Super Ultra Low Emission Vehicles, ULEV: Ultra Low Emission Vehicles. Les véhicules utilisant de l'hydrogène sont classés ZEV. Ceux qui ont un reformeur seront des ULEV ou SULEV. Si on ne considère que le véhicule, il ne produit rien s'il fonctionne à l'hydrogène, un peu de CO2, CH4, CO s'il fonctionne au méthanol ou à l'éthanol, et un peu de CO2, CH4, CO, SO2 pour de l'essence. Mais si on considère toute la chaîne du "puit à la roue", les gains apparaissent surtout au niveau du CO, NOx, particules et poussières (FVV, 97). Ces calculs

dépendent des hypothèses faites sur la provenance des carburants et la méthode d'obtention de l'hydrogène.

On peut avoir un très large spectre de résultats selon la façon de produire H2. On obtient les plus faibles émissions quand on a un véhicule PAC fonctionnant à l'hydrogène, celui ci étant produit par une électrolyse avec de l'électricité renouvelable. Ces émissions peuvent être en revanche plus élevées si l'électricité correspond à un mix européen (thermique, nucléaire, renouvelable)..

Modularité

Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 kW et plusieurs MW. Pour les piles de très petite puissance, on a recours à des techniques de miniaturisation.

Diverses températures de fonctionnement

Pour les piles de faible température de fonctionnement, c'est un avantage sur deux points:
- le rendement électrique est meilleur à basse température,
- cette température est plus adaptée aux applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite par la pile. En revanche, pour les piles de température de fonctionnement plus élevée, on peut utiliser la chaleur pour des applications domestiques ou industrielles voire un couplage avec une turbine.

Pas de parties rotatives

Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible, aucun mouvement: il n'y a donc pas d'usure mécanique pour le coeur de la pile. Sa tenue chimique et sa longévité restent encore à prouver car les prototypes actuels ont une durée de vie encore limitée.

2) Les problèmes à résoudre

- le coût,
- le poids et le volume,
- la durée de vie,
- la gestion thermique du module,
- le carburant.

Le coût

Le prix des piles est 100 fois supérieur à celui assurant la compétitivité et de 20 à 50% trop élévé pour les applications stationnaires. Ce coût se répartit entre les composants suivants (sachant que cela dépend fortement du type de pile et de sa puissance et que cela variera dans le futur avec les progrès technologiques) :

- la pile,
- le reformeur
- le convertisseur AC/DC.

Pour la pile (PEMFC), le coût va se répartir entre la membrane, les électrodes, le catalyseur, les plaques bipolaires.

- le platine qui recouvre les électrodes et dont le prix est voisin de 17 Euros/g (un prix appelé à évoluer à la hausse en fonction de la demande...), sachant que pour une pile de 70 kW, il fallait un peu plus de 400g,
- les membranes qui coûtent autour de 400 Euros/m²
- les plaques d'interconnexion et de refroidissement qui sont en graphite usiné et dont la fabrication est coûteuse, à cela s'ajoutent des auxiliaires et l'assemblage des éléments. De nombreux progrès ont déjà été faits en terme de teneur en platine, mais pour les membranes et les plaques, il faudrait revoir le processus de production et l'impact d'une production en série sur les coûts.

Poids et volume

Si ces deux aspects ne sont pas une contrainte pour les applications stationnaires, elles le sont pour les applications portables et surtout automobiles. D'une part, il faut que la pile et le module de stockage de carburant soient intégrables au véhicule sans que cela n'affecte l'habitabilité. C'est encore plus délicat avec un reformeur à intégrer en plus de la pile et où les transferts thermiques devront être gérés. D'autres part, le système pile ne doit pas être trop lourd pour ne pas affecter les performances du véhicule.

Durée de vie

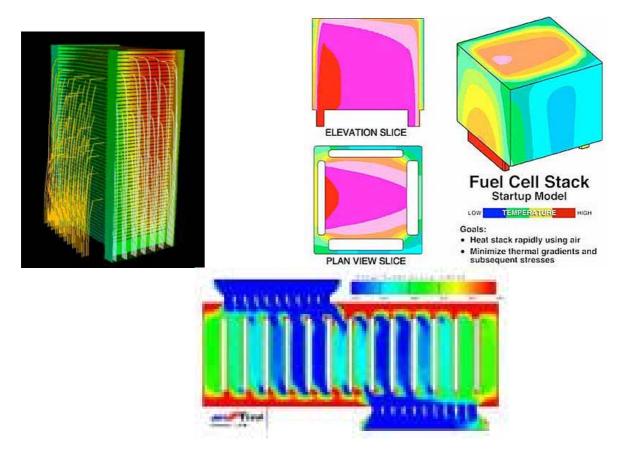
La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application:

- automobile: quelques milliers d'heures,
- stationnaire: au moins 40 000 heures.

Dans cette optique, il faut prendre en compte les frais de maintenance (inconnus pour le moment) et la possibilité de changer une ou plusieurs pièces dans le système. Seules les prototypes qui seront testés dans les années à venir permettront d'apporter une réponse. Pour le moment, les seules données sur les piles stationnaires dont on dispose viennent des PAFC ONSI 25.

Gestion thermique du module

Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose donc un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur - cela dépend du type de pile utilisée, du type d'application



(Modélisation de l'écoulement des fluides caloporteurs dans un stack).

Quel carburant?

Même si à terme, c'est l'hydrogène qui s'imposera, la question est de savoir quand et sous quelle forme; et quel carburant servira d'intermédiaire dans les applications automobiles. On a souvent avancé le méthanol mais cela impose de mettre en place tout le système de production, transport et distribution pour un carburant qui ne durera peut être que 10 ans. En utilisant l'essence, on n'a pas ce problème mais il faut utiliser de l'essence à faible teneur en soufre et avoir un reformeur adéquat. Il est aussi question d'utiliser l'éthanol qui n'est pas toxique et biodégradable. Dans tous les cas, un autre carburant que l'hydrogène impose l'utilisation d'un reformeur: une contrainte du point place. poids temps démarrage. vue et de Dans les applications stationnaires, l'utilisation du gaz naturel semble être un consensus, car c'est le plus simple à mettre en place et l'un des seuls pour lequel on a déjà l'infrastructure. Mais il faudra faire attention aux différentes qualités de celui ci. Certains gaz contiennent des impuretés comme Le fait d'utiliser de l'hydrogène suppose que l'on ait réglé le problème du stockage à bord: gazeux sous pression, liquide à très basse température, stocké dans des hydrures métalliques, des nanotubes

XIII. Présentation HOMER



HOMER est un modèle informatique développé par le NREL (Natinoal Renewable Energy Laboratory) qui simplifie la tâche d'évaluer des options de conception pour des systèmes de puissance éloignés, autonome et distribuer les demandes. L'optimisation de HOMER et des algorithmes d'analyse permettent d'évaluer la faisabilité économique et technique d'un grand nombre d'options technologiques et représenter la variation dans des dépenses et la disponibilité de source d'énergie de technologies tant conventionnelles que renouvelables :

Sources de puissance :

- · Solaire photovoltaïque (PV)
- · Éolien
- · Micro hydraulique
- · Générateur : diesel, essence, biogaz, carburants alternatifs et personnalisés
- · Réseau utilitaire électrique

Stockage:

· Banque de batterie · hydrogène

Charges:

- · Profils quotidiens avec variation saisonnière
- « Deferrable » (eau de pompage, réfrigération)
- · Thermique (chauffage d'espace, séchage de récolte)
- · Mesures d'efficacité

Vous pouvez utiliser HOMER pour exécuter des analyses pour explorer un grand choix de questions de conception :

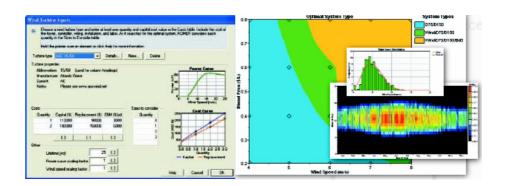
· Quelles technologies sont les plus rentables ?

De quelle taille les composants devraient-ils être ?

Ce qui arrive à l'économie du projet si les dépenses ou chargent le changent ?

Est-ce que la ressource renouvelable est adéquate?

HOMER trouve la combinaison de coût moindre des composants qui rencontrent des charges électriques et thermiques. HOMER simule des milliers de configurations de système, optimise pour le coût de cycle de vie et produit les résultats d'analyses sur la plupart des entrées.



Simulation

HOMER simule l'opération d'un système en faisant des calculs d'énergie pendant chacune des 8,760 heures dans une année.

HOMER décide aussi pendant chaque heure comment faire fonctionner les générateurs et s'il faut charger ou décharger les batteries. Si le système rencontre les charges pendant l'année entière, HOMER estime le coût du cycle de vie du système, représentant le capital, le remplacement, l'opération et la maintenance, le carburant et des dépenses d'intérêt. On peut voir des flux d'énergie horaires pour chaque composant aussi bien que le coût annuel et des résumés des performances.

Optimisation

Après la simulation de toutes les configurations de système possibles, HOMER montre une liste de systèmes faisables, triés par le coût du cycle de vie. Vous pouvez facilement trouver le système de coût moindre en haut de la liste, ou vous pouvez parcourir la liste pour d'autres systèmes faisables.

Vous pouvez exécuter une analyse de sensibilité sur presque n'importe quelle entrée en assignant plus qu'une valeur à chaque entrée. HOMER répète le processus d'optimisation pour chaque valeur de l'entrée pour que vous puissiez examiner l'effet de changements de la valeur sur les résultats. Vous pouvez spécifier autant de variables de sensibilité comme vous voulez et analysez les résultats.

XIV. Etude de cas : Aéroport Roland Garos (St Denis)

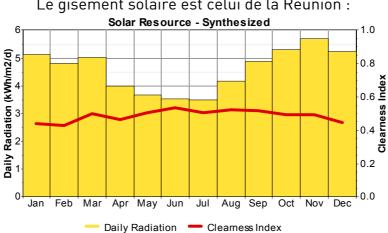


Apres concertation avec M.RAT directeur de l'ARER une cible d'étude d'application pour la pile à combustible a été identifiée : L'aéroport Roland Garos de St Denis.

Mon rôle était d'intégrer une équipe travaillant déjà sur la stratégie énergétique de l'aéroport et proposer une solution pile à combustible en fonction des données et contraintes du site.

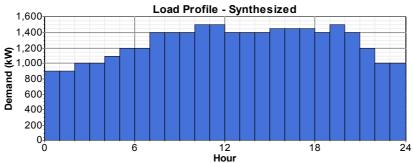
1) Hypothèses et dimensionnement

Les calculs ont été effectués avec le logiciel de dimensionnement HOMER développé par le NREL.



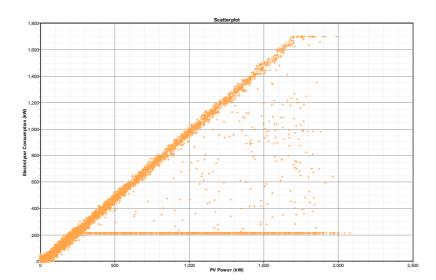
Le gisement solaire est celui de la Réunion :

La courbe de charge des consommations électriques de l'aéroport considérée pour le dimensionnement est la suivante pour une journée de février, lorsque les consommations sont les plus importantes dues aux appels de la climatisation en été (hémisphère sud).



L'hydrogène doit provenir d'une ressource renouvelable. Un potentiel photovoltaïque de 1700kW crête a été évalué sur le site de l'aéroport.

L'hydrogène sera donc produit à partir d'électrolyse. Pour dimensionner l'électrolyseur, et afin de transformer un maximum d'énergie solaire en hydrogène on prendra un électrolyseur de puissance égale aux 1700 kWc.



Ces points sont une simulation de la puissance photovoltaïque fournit (en abscisse) et de la consommation de l'électrolyseur (ordonnée)

On remarque que la plupart du temps le gisement solaire est limitant, cependant les points qui ne suivent pas la droite de proportionnalité sont obtenus lorsque les réservoirs d'hydrogène sont pleins. Ce dernier cas est cependant minoritaire.

Les caractéristiques de la pile à combustible étudiée sont celles de la UTC PC 25. Actuellement ce produit est disponible pour un prix de 900 000 \$US mais il fonctionne au gaz naturel, un produit équivalent est sur le point d'être commercialisé fonctionnant à l'hydrogène, donc sans reformage. Dans la suite des calculs *les caractéristiques de la PC25 ont été transposé à une pile équivalente fonctionnant grâce à l'hydrogène.*



PAC ONSI Corp, 200kWe au gaz naturel

Caractéristiques :

Dimensions pour une pile de 200 kWe PEM PC25

L: 6m L:3m

H:3m

264kW th à pleine charge 900,000 Btu/hr @ 140F

ou

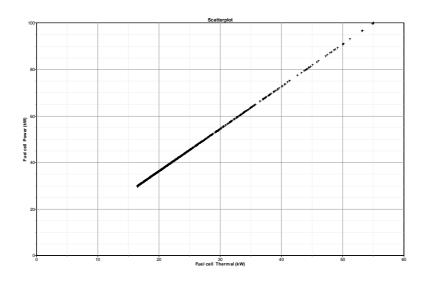
450,000 Btu/hr @ 140F

(80°C)

450,000 Btu/hr @ 250F

(120°C)

1 BTU = 1055 joules



Le graphique ci-dessus représente la puissance électrique de la pile à combustible en fonction de la puissance thermique, on remarque donc que la puissance thermique délivrée par la pile est directement proportionnelle à la puissance électrique.

Le stockage de l'hydrogène est supposé se faire sous forme gazeuse, en effet le stockage sous forme liquide est trop énergivore (40 à 50 % de l'énergie de l'Hydrogène).



Les dimensionnements de stockage de l'hydrogène ont été fait suivant plusieurs hypothèses :

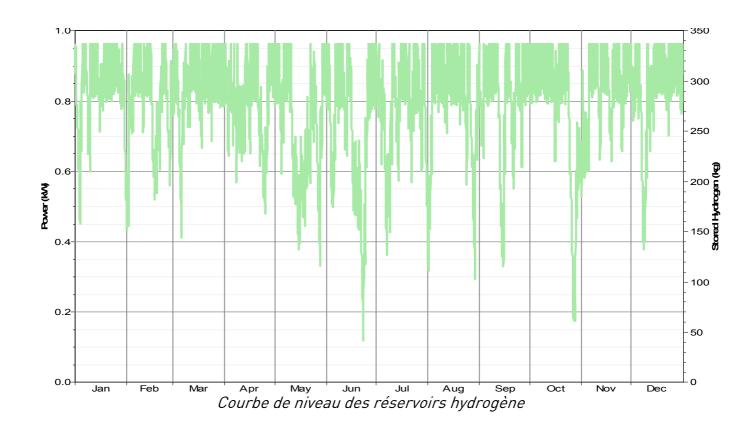
Le système doit être autonome en hydrogène : Il ne doit y avoir aucun apport d'hydrogène de l'extérieur, les réservoirs d'hydrogène sont considérés comme stockage d'énergie, ainsi du premier janvier, au premier janvier suivant les réservoirs d'hydrogène doivent être au même niveau.

Un premier calcul a été effectué en essayant de minimiser au possible le stockage onéreux de l'hydrogène

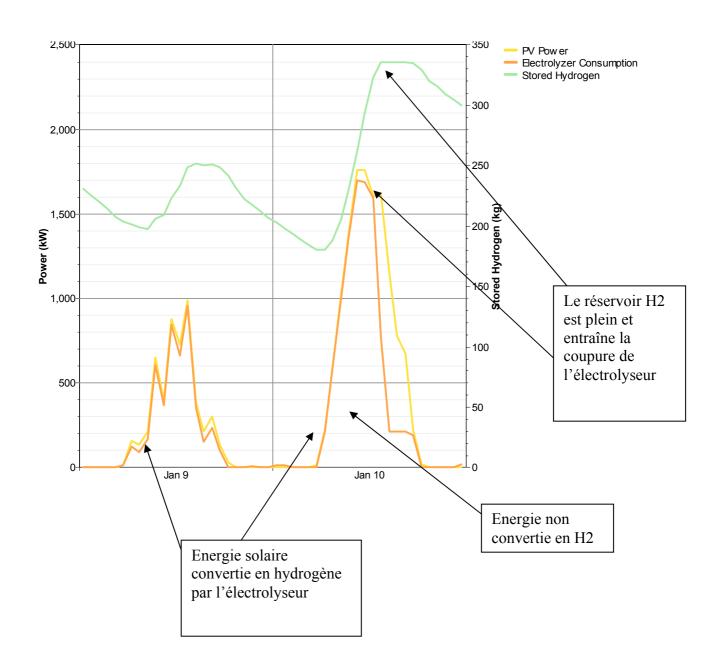
Un second calcul en optimisant l'énergie produite par la pile et la production d'hydrogène.

2) Premier calcul

- Pile à combustible: 200kWe
- Electrolyseur : 1700 kW
- Stockage H2 : 340 kg (12Nm3 /kg)
- Soit 4080 Nm3 à stocker = 6m3 sous 700 bars
- Consommation électrolyseur : 2 033 000kWh
- Production électrique (simulation sur un an): 696 000 kWh
- Production thermique: 570 000kWH
- Temps de fonctionnement : 8760 heures par an
- Durée de vie : estimée à 40 000 heures
- Puissance électrique moyenne : 65,1kW
- Puissance électrique minimum : 60 kW
- Puissance électrique maximum : 152 kW
- Puissance thermique moyenne: 79,5 kW
- Puissance thermique minimum: 73,3kW
- Puissance thermique maximum: 185,6 kW
- H2 consommé : 44 t/an
- Consommation spécifique : 0,077 kgH2/ kWh
- Rendement électrique : 39 %
- Rendement cogénération: 86%



On remarque que le niveau revient au même niveau après une année de fonctionnement .Les mois de juin et juillet sont caractérisés par un faible ensoleillement (hémisphère sud) et le niveau d'hydrogène est au plus bas.



On comprend mieux sur cette figure la relation entre solaire-electrolyseur-reservoir hydrogène. Un réservoir d'hydrogène trop petit entraînera une coupure de l'électrolyseur, et donc c'est autant d'énergie solaire non convertie

Un deuxième calcul a été lancé afin d'optimiser l'énergie produite.

3) Second calcul

Pile à comb.: 200kWElectrolyseur : 1700 kW

Stockage H2: 2000 kg (12Nm3 /kg)

• Soit 24000 Nm3 à stocker = *35m3 sous 700 bars*

• Consommation électrolyseur : 2 565 000kWh

• Production électrique (simulation sur un an): 720 000 kWh

Production thermique: 880 000kWh

• Temps de fonctionnement : 8760 heures par an

• Durée de vie : estimée à 40 000 heures

Puissance électrique moyenne : 82kW
Puissance électrique minimum : 60 kW
Puissance électrique maximum : 200 kW

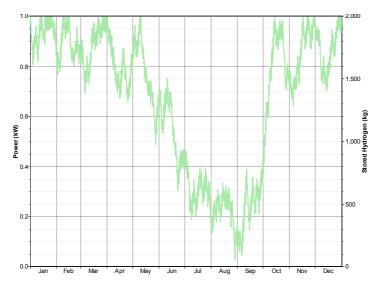
Puissance thermique moyenne : 100 kW
Puissance thermique minimum : 73,3kW
Puissance thermique maximum : 244 kW

• H2 consommé : 55 t/an

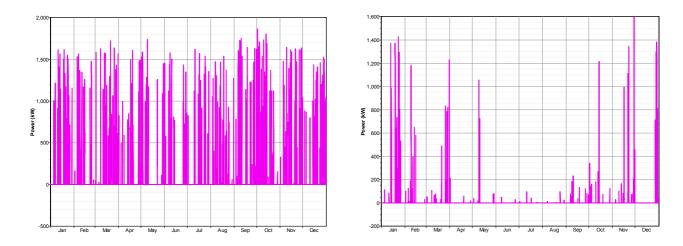
• Consommation spécifique : 0,077 kgH2/ kWh

Rendement électrique : 39 %Rendement cogénération: 86%

On remarque surtout que la pile tourne en moyenne à 41% de ses capacités, ceci est du à la limitation du combustible (hydrogène) disponible avec l'hypothèse de l'autonomie du système : même niveau de H2 janvier à janvier . Cependant elle intervient à pleine charge lors des forts appels de puissance.



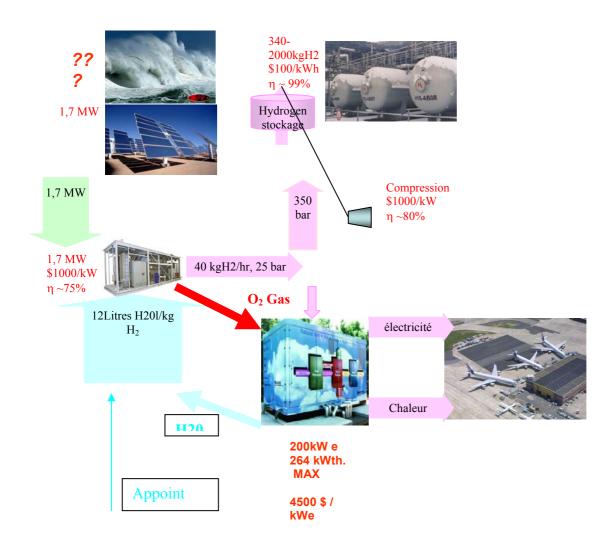
Courbe de niveau des réservoirs hydrogènes (seconde configuration)



A droite la quantité d'énergie non stockée lors de la première configuration ou excès d'électricité A gauche la quantité d'énergie non stockée lors de la seconde configuration

Pour absorber toute la quantité d'énergie fournie par les panneaux solaires il aurait fallu des réservoirs d'hydrogène bien plus importants.

4) Synoptique de l'aéroport



Ce synoptique résume le système étudié pour l'aéroport. On observe ici les différentes étapes de conversion, malheureusement le gisement énergie des vagues n'a pas pu être correctement évalué dans sa puissance et son comportement. Il m'a donc été impossible d'en simuler la production avec HOMER

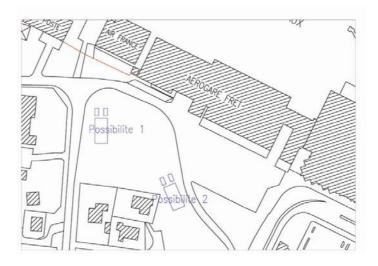
On remarque qu'il est nécessaire de faire un appoint en eau, mais celui-ci reste très minime par rapport aux masses d'eau qui sont décomposées puis recombinées.

5) Implantation du système pile à combustible

L'implantation d'un système pile à combustible (Pile + électrolyseur + stockage hydrogène) serait optimum prêt des consommateurs en énergie thermique, ainsi on pourrait coupler la pile à combustible à un réseau de chaleur et bénéficier de ses 86% de rendement en cogénération .Le stockage d'hydrogène peut être enterrer à la manière des cuves de gaz, le système n'a aucun effet polluant chimique et acoustique. Il reste cependant à déterminer la classification de l'hydrogène en terme de risque. Aucune information précise n'a été obtenue, la technologie étant encore au stade de développement.



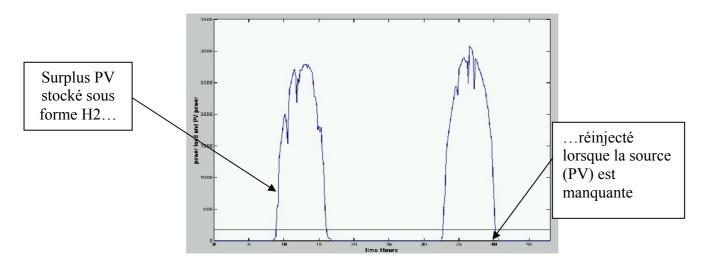




6) Discussion de la validité de l'étude aéroport.

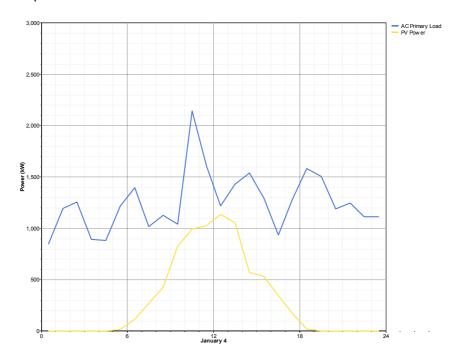
On est en droit de se poser la question de la viabilité énergétique de la solution PV+Pile à combustible sur l'aéroport de Roland Garos.

L'hydrogène est un vecteur énergétique, il se justifie lorsqu'une source d'énergie est en surplus par rapport à la consommation, ainsi on peut stocker ce surplus sous forme d'hydrogène et le réinjecter lorsque la source est trop faible pour assumer la demande en énergie seule.



Dans l'exemple ci-dessus nous avons en noire et linéaire la courbe de charge d'un système et en bleu la production d'énergie PV. On remarque ici un fort surplus qui sera utile à stocker sous forme d'hydrogène et de réinjecter celui-ci lorsque la source est manquante.

Dans l'exemple ci-dessous nous avons la courbe de charge de l'aéroport et la production solaire PV. On remarque que la production de solaire n'est pas à 100% de ses capacités (1,3MW) au lieu de 1,7 MW) ce qui risque d'être souvent le cas.



Aucun surplus PV< Charge Pas de stockage

On remarque que la production de solaire est en dessous de la puissance appelée par l'aéroport, il n y a donc aucun surplus à stocker. Il serait donc énergétiquement incohérent de vouloir stocker la production solaire sous forme d'hydrogène car nous ne ferons que multiplier les rendements de conversion et donc une perte conséquente d'énergie.

Le système PV+pile à combustible montre donc ses limites et est *non viable* pour l'aéroport.

Il existe deux types de solutions :

Le premier consiste à diminuer l'appel de puissance de l'aéroport et cela passe par une forte maîtrise de l'énergie, de nouveaux systèmes de climatisation etc...

Le second consiste à augmenter la production d'énergie renouvelable en augmentant si possible le parc PV, ou en le couplant à des générateurs énergie des vagues qui représentent eux aussi une source difficile à prévoir et donc à stocker.

Dans une étude future il serait intéressant d'étudier (HOMER ne l'intègre pas encore) le couplage PV+MDE+Energie des vagues + Hydrogène .Nous aurions ainsi un système énergétique propre efficace et qui augmenterait l'indépendance énergétique de l'île.

XV. Etude de cas : Ilet la nouvelle cirque de Mafate

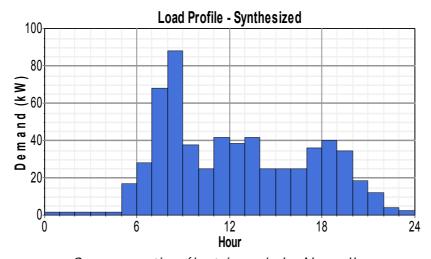


L'étude de l'option hydrogène pour l'électrification du village isolé de La nouvelle dans le cirque de Mafate s'inscrit dans la continuité des travaux de l'ARER sur les sites décentralisés.

J'ai donc repris les résultats de M. GAUDAIRE ancien stagiaire ARER et étudiant en licence STER promotion 2003. A partir de ses chiffres et de ses conclusions j'ai déterminé le profil énergétique de l'Ilet puis je l'ai intégré au calculateur HOMER.

1) Profil énergétique de La Nouvelle

Les données :



Consommation électrique de La Nouvelle

Consommation:850kWh/jour

Objectif énergétique évalué par M GAUDAIRE :

Calcul de l'énergie électrique à fournir :

ETotale = Eactuelle + ESup = 140 000 + 170 000 ETotale1 = 310 000 kWh/an (hypothèse haute)

Energie thermique à fournir :

On obtient ainsi un besoin de 131 500kWh/an.

Voici quelques résultats des sondages menés au sein de La Nouvelle concernant les perspectives et l'état des lieux du système énergétique de l'Iet.

Type de système d'électrification et mode de paiement désirés : ini réseau 66,6 %

Ce que les Mafatais pensent des groupes électrogènes : Bruyants : 83 %

Chers: 36 % Polluants: 28 %

Satisfaction des systèmes photovoltaïques : Satisfaits mais ne produisent pas assez

d'électricité : 56 %

On peut supposer que la centrale pile à combustible remplisse les attentes en termes de nuisances sonores et chimiques .Il y a aussi une réelle volonté d'évoluer vers un mini réseau. Reste à évaluer les puissances du système à mettre en place.

Un potentiel Micro hydraulique de 28L/s sur 80 mètres de dénivelé. P = débit * dénivelé* accélération (9,81) * rendement turbine <math>P = 28 * 80*9.81*0.85 = 18.68 kW

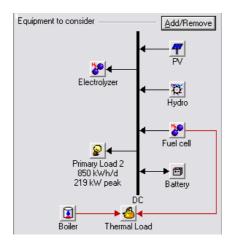
Une puissance PV déjà installée évaluée à 72kWc

2) Les hypothèses de départ :

Mini réseau basse tension
Mini centrale hydrogène
Autonomie énergétique totale du village
Anticipation de la croissance de la consommation énergétique
Technologie de pile PEMFC et rendement électrique de 50%
Réservoir d'hydrogène le plus petit possible pour minimiser les coûts et pour raison réglementaire et de sécurité.

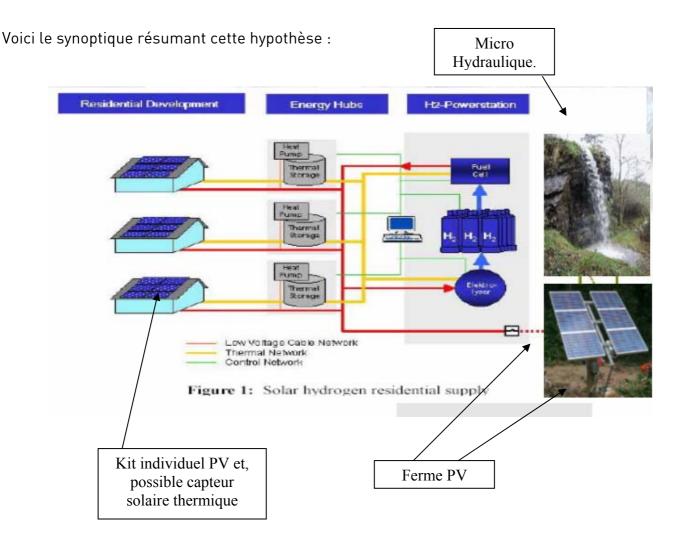
Voici ci-dessous l'architecture du mini réseau programmé sur HOMER .

On remarque la présence des ressources renouvelables évaluées par M GAUDAIRE . La pile à combustible est considérée ici comme fonctionnant en cogénération pour assumer charge thermique et électrique.



L'objectif est donc de connecter la production d'énergie par mini réseau à partir des installations déjà sur place en PV, la micro hydraulique, la future ferme PV, et la construction d'un mini réseau de chaleur à partir de la pile à combustible.

Une chaudière (boiler) au bois a été programmée en appoint aux réseaux de chaleur.



Ainsi les kits individuels PV sont couplés aux centrales micro hydraulique, ferme PV et hydrogène. En parallèle un réseau de chaleur avec stockage par hydro accumulation.

On peut supposer le couplage de capteur solaire thermique avec ce réseau de chaleur. Apres avoir entrer toutes ces hypothèses voici le dimensionnement obtenu avec HOMER

- PV:450kWPAC:100kWMCH:19kW
- Stockage H2:350kgElectrolyseur : 470kW
- Consommation: 850kWh/jour
 Production électrique:273 000kWh
 Production thermique :164000 kWh
- 3Batteries Surette 4KS25P: 1900Ah/batterie

Caractéristique du système PAC

- Temps de fonctionnement : 8760 heures par an
- Durée de vie : estimée a 40 000 heures
- Puissance électrique moyenne : 31,2kW
- Puissance électrique minimum : 30 kW
- Puissance électrique maximum : 100 kW
- Puissance thermique movenne: 19 kW
- Puissance thermique minimum: 18kW
- Puissance thermique maximum: 60 kW
- H2 consommé : 16383 kg
- Consommation spécifique : 0,06 kgH2/ kWh
- Rendement électrique : 50 %Rendement cogénération: 80%

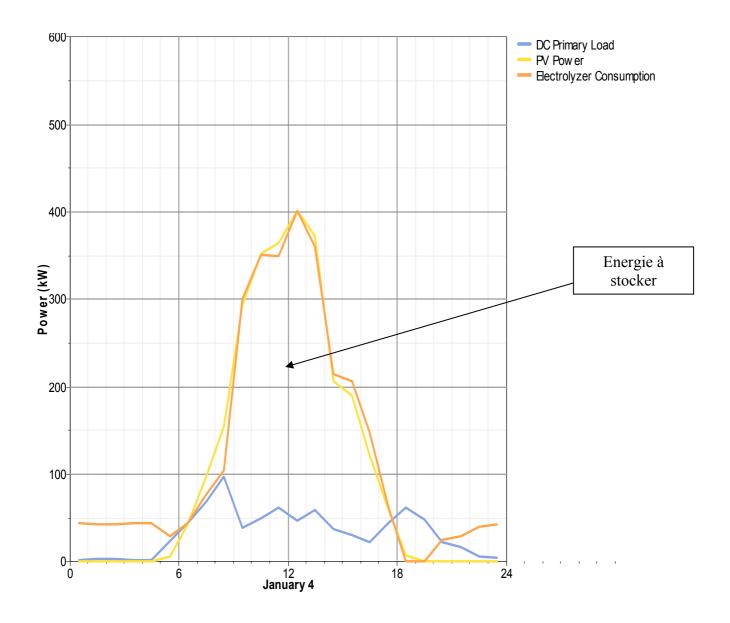
3) Discussion des résultats

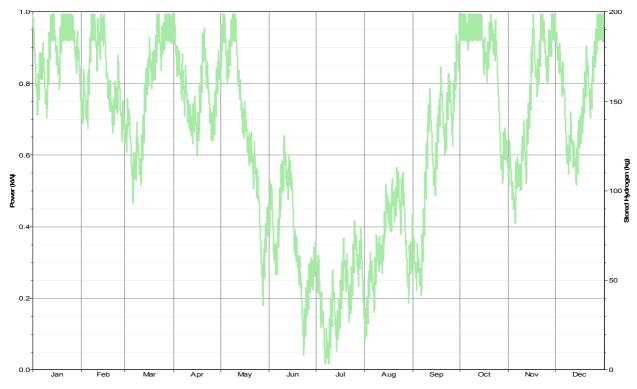
Tout d'abord nous pouvons constater que le système est énergétiquement faisable, nous sommes dans une configuration ou l'hydrogène apporte un réel plus à la production d'énergie.

HOMER a dimensionné un système photovoltaïque de 450kWc ce qui correspond à une ferme de : 378 kWc qui s'ajouteraient aux 72kWc déjà existants.

Des batteries spéciales énergies solaires ont été rajoutées par sécurité.

On remarque une forte production d'énergie d'origine photovoltaïque , comparée à l'appel des consommations (bleu) il est donc très utile de pouvoir stocker ce surplus sous forme d'hydrogène comme le fait l'électrolyseur (orange)



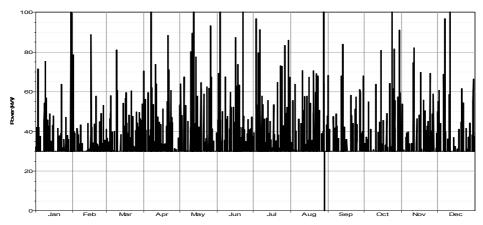


Courbe de niveau des réservoirs d'hydrogène

On remarque que le système est complètement autonome, le niveau des réservoirs est toujours au maximum à la date du premier janvier.

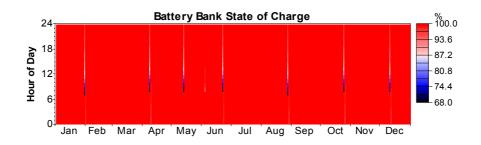
La période Juin-Juillet est caractéristique d'un manque de soleil donc de réserves en hydrogène faibles .On note que les réservoirs sont identiques à la première configuration de l'aéroport (350kgH2) pour une pile beaucoup plus puissante, cependant le système de l'aéroport disposait d'un électrolyseur beaucoup plus puissant et pouvait se permettre de stocker moins d'hydrogène.

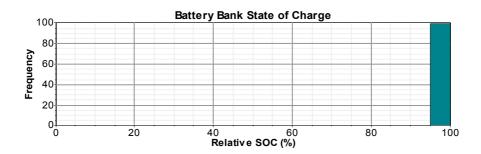
La pile à combustible a été dimensionnée à 100 kWe mais son fonctionnement est en moyenne de 30 kW soit 30% de ses capacités, on peut donc supposer une durée de vie plus longue du matériel. La pile a été évaluée à 100 kW car le réseau fait des appels de puissances ponctuellement ce qui amène la pile à monter en charge et tourner à 100%.



Courbe de puissance de la pile sur La Nouvelle

Le parc de batteries dimensionné s'est avéré vital pour le système, en effet si on supprime ce parc de batteries le système est qualifié de non viable par HOMER. Cependant on peut voir cidessous qu'elles ont été très peu sollicitées





Elles interviennent réellement sur le système 7 fois sur une année ce qui correspond dans la simulation à des périodes de mauvais temps prolongés.

La pile fournit donc 273 000 kWh ce qui correspond à 88% des 310 000 kWh demandé par le village. Les 12% restant étant assumés par la centrale micro hydraulique qui partage sa production pour alimenter le réseau et l'électrolyseur.

Elle fournit aussi 164 000 kWh thermique ce qui correspond à 125% de la demande du village. Il sera alors intéressant de bénéficier des performances de la pile comme cogenerateur et ainsi de son rendement de 80 %.

En ce qui concerne la ferme solaire sa taille serait pour 378kWc selon l'étude de M GAUDAIRE de l'ordre de 3155m2 avec des capteurs de 12% de rendement.

Pour réduire la taille on peut essayer de trouver des capteurs ayant de meilleurs rendements. Nous avons aussi évalué que la toiture des habitations du village pouvait facilement accueillir trois fois plus de kit solaire ce qui ferait une puissance de 216 kWc en toitures et donc une ferme de 234 kWc pour fournir les 450 kWc solaire.

Une ferme de 234kWc aurait une surface évaluée à environ 1950 m2.

Pour ce qui est de la micro hydraulique deux ravines proches de La Nouvelle peuvent fournir un potentiel énergétique supplémentaire important



La centrale Hydrogène devra être suffisamment proche des habitations pour alimenter un réseau de chaleur, proche de la ferme photovoltaïque pour éviter les lignes basse tension. Apres une rapide étude sur le terrain un site à été localisé comme pouvant accueillir la centrale.



L'électrification par mini réseau de l'Îlet La Nouvelle est donc <u>énergétiquement viable.</u>

Voici actuellement ce à quoi pourrait ressembler les équipements des la centrale Hydrogène

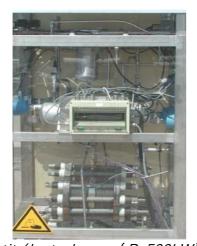


Pile couplée avec un seul gros réservoir d'hydrogène qui peut être enterré au besoin





Réservoir d'hydrogène sous forme de bouteille. Chaque bouteille contient 5kg d'hydrogène, pour des dimensions : l=0,5m L=2m. L'avantage de ce système est que le stockage d'hydrogène est modulable à souhait.



Petit électrolyseur (P<500kW)



PEMFC de 25 kW qui peut se coupler sans problèmes avec d'autres piles de la même marque pour donner des systèmes de 25, 50 ou 100 kWe

4) Limites de l'étude

Même si l'étude montre que le système est viable, il faut savoir que certaines informations sont manquantes. En effet, la ressource hydraulique a été évaluée sur une moyenne annuelle. Hors il est fréquent que le débit, et donc les puissances, varient d'un facteur important, ce qui peut remettre en cause le dimensionnement du réservoir d'hydrogène. Lors de la campagne de mesure 2003 il n'y a pas eu de prise en compte des besoins et des modes de consommation d'énergie thermique. Aucune courbe de charge thermique n'a pu être intégrée dans HOMER.

Ensuite, il serait intéressant de faire une topographique du terrain de La Nouvelle et intégrer ces donnés au logiciel Vipor (voir présentation Vipor) pour avoir une meilleur idée de l'architecture du réseau qui peut parfois représenter plus de 50% du budget du projet.

Enfin j'ai eu l'occasion de me rendre personnellement à La Nouvelle et j'avoue avoir été surpris de voir des bungalows chauffés électriquement. Il y a sûrement un énorme <u>travail de communication et de maîtrise de l'énergie</u> à mettre en place pour ces populations.

XVI. Conclusion

Sur les deux cas d'applications étudiés, on peut considérer que seul celui de La Nouvelle est viable. En effet, pour l'aéroport, sa situation géographique et ses contraintes sécuritaires peuvent remettre en cause la viabilité d'un projet pile à combustible à partir d'hydrogène renouvelable sur le site. Il sera intéressant de suivre les expériences sur l'aéroport de Munich. Pour ce qui est de l'électrification décentralisée la viabilité technique est démontrée, reste à convaincre les investisseurs ce qui est déjà le cas pour l'île d'Utsira en Norvège , une île d'une population d'une centaine d'habitants va fonctionner grâce à une centrale éolienne-hydrogène. On peut supposer qu'avec des subventions de la région et de l'Europe, une telle expérience pourrait voir le jour à la Réunion.

L'hydrogène est le vecteur énergétique idéal des énergies renouvelables. Produit à partir de celles-ci, il permet d'obtenir un cycle énergétique du puit à la roue avec une très faible émission polluante. Certes, ces cycles sont vivement critiqués car considérés comme peu rentable tant du point de vue énergétique qu'économique. Mais, à toutes ces critiques, je rétorquerai que pour vraiment considérer et comparer les énergies renouvelables couplées à une production d'hydrogène avec les cycles des énergies fossiles et polluantes, peut être faudrait il prendre aussi en compte l'énergie grise, ou la quantité d'énergie à consommer pour produire de l'énergie. Il faudrait tenir compte des infrastructures de transport, des investissements militaires qui garantissent l'approvisionnement en énergies fossiles, le coût sur la productivité d'un pays de la pollution, et donc de la santé des travailleurs engendré par ces même énergies fossiles. C'est peut être une fois tous ces paramètres pris en compte que la filière hydrogène renouvelable trouvera un débouché à grande échelle. C'est pour le moment l'objectif affiché par l'Island qui s'est donné comme objectif d'être indépendant énergétiquement grâce à ses gisements d'énergie renouvelable complétés par le vecteur hydrogène.

Mes compétences acquises en licence STER à Tarbes m'ont permis de bien appréhender le dimensionnement des installations énergie renouvelable et les cours sur la pile à combustible ont été une bonne base pour communiquer sur cette technologie. Le stage au sein de l'ARER m'a permis de rencontrer plusieurs stagiaires de différents horizons et de m'exercer à convaincre un auditorium à la cause « pile à combustible ». J'ai pu apprendre sur le fond en travaillant sur des outils comme HOMER et sur la forme en participant à des séminaires de restitution devant des professionnels et des réunions de travail. Cette expérience est donc à mon sens irremplaçable afin de pouvoir intégrer le monde professionnel des énergies renouvelables. Mon seul regret a été de devoir quitter si tôt le groupe hydrogène constitué de plusieurs élèves ingénieurs qui ont permis une réelle montée en charge des activités du groupe. Cependant, on peut être optimiste sur la volonté de l'ARER de faire perdurer les activités du groupe hydrogène à la Réunion qui pourraient éventuellement déboucher sur la création d'une agence réunionnaise de l'hydrogène.

En ce qui concerne les annexes, on y trouve une présentation et une petite explication du logiciel Vipor que je n'ai malheureusement pas pu étudier en profondeur mais qui reste un excellent outil. Un exemple concret d'un projet dimensionné par HOMER.

Je me suis permis d'y ajouter des articles sur les travaux de Meyer concernant la construction d'un nouveau type d'électrolyseur. Je ne cautionne ni ne dénonce ses travaux, je serais très curieux de pouvoir expérimenter sa théorie, cependant plusieurs questions à son sujet m'ont été

i suivent de près l'évo	. e, a. egemei		

XVII. Bibliographie

Les documents qui m'ont aidé pour cette étude :

Fuel Cell Technology Handbook G. Hoogers



Fuel Cell Systems explained J. Larminie A Dicks



Hydrogen Economy J RiFkin



Document video Hawai Hydrogen



Rapport de colloque à Grenoble : "La pile à combustible à partir d'hydrogène renouvelable"



XVIII. Webographie

http://www.nrel.gov/

http://www.electrolysers.com/

http://www.utcfuelcells.com

www.arer.org

WWW.fuelcell2000.org

WWW.fuelcelltoday.com

XIX. Lexique

AFC: Alkaline Fuel Cell

Pile dont l'électrolyte est de type alcalin et à faible température de fonctionnement.

Catalyseur

Substance permettant d'accélérer la vitesse d'une transformation chimique, mais qui se retrouve inchangée à la fin de la réaction. Des catalyseurs sont notamment utilisés au niveau des réactions aux électrodes (le catalyseur est souvent du platine (Pt)) et dans le reformeur.

Cogénération

La cogénération permet de produire simultanément du travail (sous forme d'énergie électrique) et de la chaleur (voire éventuellement dans certains cas: du froid). Cette chaleur se présente sous forme de vapeur d'eau à pression élevée ou sous forme d'eau chaude. La cogénération permet un excellent rendement énergétique.

Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot correspond à un processus cyclique réversible où un gaz parfait est enfermé dans un cylindre aux parois isolantes fermé par un piston placé entre deux sources de chaleur, chaude et froide. Le cycle est constitué de deux détentes (isotherme et adiabatique), et deux compressions (isotherme et adiabatique). Cette machine fonctionnant de manière irréversible, nulle machine fonctionnant ainsi entre deux sources de chaleur données ne peut être plus efficace qu'une machine de Carnot. Ce cycle permet donc de comparer un cycle idéal et un cycle réel

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell

Pile dont l'électrolyte est une membrane échangeuse de protons et fonctionnant au méthanol.

Electrode

Endroit où se produisent les réactions électrochimiques. Ces pièces conductrices, appelées anode et cathode, permettent la circulation des électrons.

Electrolyse

Le principe de l'électrolyse est le contraire de celui de la pile. Elle consiste à imposer un courant électrique dans une solution (qui peut être aqueuse, un solvant voire un sel fondu). On assiste alors à une migration des ions et des réactions aux électrodes: une oxydation anodique et une réduction cathodique. Dans l'électrolyse, l'anode est positive et la cathode négative.

Electrolyte

Partie de la pile permettant le passage d'ions chargés de l'anode vers la cathode ou inversement, induisant ainsi une différence de potentiel entre les électrodes et le déplacement des électrons.

MCFC: Molten carbonate Fuel Cell

Pile dont l'électrolyte est de type carbonates fondus et à haute température de fonctionnement

Oxydation

Perte d'électrons par un atome ou un ion. Elle est l'inverse d'une réaction de réduction; les deux se passant dans une réaction Rédox.

PAFC: Phosphoric Acid Membrane Fuel Cell

Pile dont l'électrolyte est à base d'acide phosphorique.

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Pile dont l'électrolyte est une membrane échangeuse de protons

Réduction

Gain d'électrons par un atome ou un ion. Elle est l'inverse d'une réaction d'Oxydation; les deux se passant dans une réaction Rédox.

Reformeur

Réacteur permettant de transformer un combustible (essence, méthanol, éthanol, méthane, ...) en un mélange gazeux contenant principalement de l'hydrogène et du CO2 au cours d'une réaction catalysée.

Stack

Ensemble de cellules élémentaires assemblées en série ou en parrallèle pour obtenir la puissance voulue.

SOFC: Solid Oxid Fuel Cell

Pile avec un électrolyte de type oxyde solide et à haute température de fonctionnement.

XX. ANNEXES

1) <u>Informations complémentaires et techniques sur le principe élémentaire de fonctionnement d'une pile à combustible (partie IX)</u>

Tension

Si l'ensemble de l'enthalpie libérée par la réaction pouvait être retrouvée sous forme d'une différence de potentiel, la tension E_{th} délivrée par la pile serait:

$$E_{th} = -\frac{AH}{nF}$$

En fait, d'après le second principe de la thermodynamique, la part correspondant à l'entropie ne peut être transformée en travail électrique. Or, le travail est égal à la variation d'enthalpie libre au cours de la réaction chimique.

$$W = -\Delta G$$

Le travail récupérable correspond au déplacement des électrons dans le circuit extérieur. Il est égal à:

$$W = n F(E_a - E_c)$$

avec E_a et E_c les potentiels à l'anode et à la cathode. Le travail maximal récupérable par la pile (quand les pertes peuvent être négligées) est donc :

$$W_{\text{max}} = n F (E_a - E_c)_{\text{max}}$$

La tension maximale récupérable est donc E_{rev}:

$$\mathbf{E}_{\text{rev}} = -\frac{\mathbf{\Delta}\mathbf{G}}{\mathbf{n}\mathbf{F}}$$

La tension maximale aux bornes de la pile s'exprime donc en fonction de la température:

$$(E_a - E_c)_{max} = E_{rev} = -\frac{(\Delta H - T \Delta S)}{n F}$$

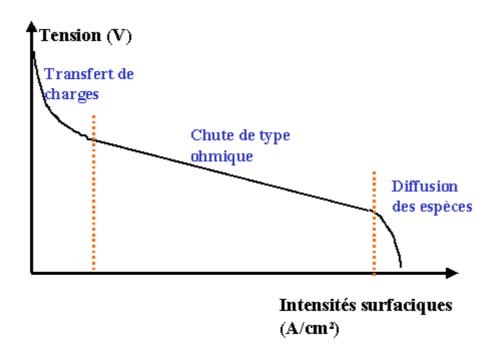
La variation d'entropie étant négative (diminution du nombre de moles), la tension maximale aux bornes de la pile diminue quand la température augmente. Le rendement théorique de la pile, soit le rapport entre Erev et Eth, diminue donc lui aussi en fonction de la température.

La différence entre le potentiel de la cathode et celui de l'anode représente en fait la fem de la pile:

$$E = E_{cathode} - E_{anode}$$

Cinétique des réactions

Lorsque la pile débite, l'intensité est non nulle et des surtensions apparaissent aux électrodes. Ces surtensions apparaissent aux électrodes dans la membrane, et sont dues à des phénomènes de transfert de charge, de diffusion des espèces, de vitesse limitée aux électrodes.



Caractéristiques "Tension-Courant surfacique"

Rendement de la pile

Thermodynamiquement, le rendement de la pile est égal au rapport entre le travail électrique récupérable et de l'enthalpie de la réaction:

$$\eta = -\frac{W_e}{\Delta H}$$

Le travail égal à:

$$W = n F(E_a - E_c)$$

Ce qui en exprimant le travail en fonction de l'enthalpie et de l'entropie donne

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T \Delta S}{\Delta H}$$

Pour une pile H2/O2 à 25°C, le rendement théorique est de 83% ou 95% selon que l'eau est liquide ou gazeuse.

Dans la réalité, il existe toujours des phénomènes d'irréversibilité des réactions: on vient de voir entre autres que les surtensions baissent le niveau de la tension théoriquement récupérable. Le rendement réel est donc inférieur à ce rendement thermodynamique idéal.

Baisse de rendement due aux surtensions

Le catalyseur utilisé, l'état des électrodes, l'utilisation de l'air au lieu d'oxygène pur ainsi que les conditions de température et de pression ont une influence déterminante sur la dissociation de l'hydrogène et de l'oxygène ainsi que sur les échanges au niveau de la zone de triple contact. En pratique, les surtensions sont plus élevées avec l'oxygène que l'hydrogène. A ceci s'ajoute la résistance due à l'électrolyte ainsi que les déséquilibres entre les espèces présentes aux électrodes : protons, ions hydroxyles, ou espèces ioniques présentes dans électrolyte. Ce rendement se calcule par le rapport entre la tension de la pile et la tension E_{rev} à, la température concernée.

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{U}{E_{\text{rev}}}$$

Rendement faradique

Ce rendement tient compte du nombre d'électrons effectivement obtenus par mole de carburant présent. Pour l'hydrogène, on a en général un rendement de 1 (c'est à dire 2 électrons par mole d'hydrogène); en revanche pour le méthanol, on n'a pas les 6 électrons attendu : ceci est dû à la formation de formaldéhyde ou d'acide formique. Pour une DMFC, ce rendement peut chuter à 0,66 ou 0,33 selon le nombre d'électrons échangés.

Le rendement faradique tient aussi compte des possibilités de court circuit interne, soit par conduction électronique dans l'électrolyte, soit par mise en contact du combustible et du comburant.

Rendement matière - Quantités de combustibles

Ce rendement concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes. En effet, dans une pile, chaque ensemble "membrane-électrodes" doit être alimenté de manière identique, ce qui suppose un même débit et des pressions partielles identiques. Ces ensembles étant en série, tout défaut pour l'un d'eux se répercute sur tous les autres. Pour cette raison, les réactifs sont souvent mis en sur-stoechiomètrie. On a typiquement des sur-stoechiomètries de 1,4 pour H_2 et de 1,7 pour l'air. Un plus fort excès d'air est nécessaire car il contient pour 80% d'espèces inertes $\{N_2\}$ qui ont un effet sur l'avancement des réactions. A cause de cet excès, l'hydrogène ne sera pas entièrement consommé.

Rendement système

Que ce soit dans des applications mobiles ou stationnaires, une pile ne fonctionne pas seule : des composants périphériques sont nécessaires. Il s'agit de compresseur, du système de contrôle,

des échangeurs de chaleur, du système de reformage (désulfuration, réformeur, échangeur, purification des gaz). Ces composants ont une consommation qui vient baisser le rendement.

Rendement général de la pile

Le rendement de la pile est le produit de tous les rendements vus précédemment:

$$\eta_{\text{pile}} = \eta_{\text{sys}} \ \eta_{\text{mat}} \ \eta_{\text{fara}} \ \eta_{\text{rev}} \ \eta_{\text{elec}}$$

Exemple:

Considérons une pile PEMFC fonctionnant à 80°C avec de l'hydrogène avec une tension de 0,7 V pour 350 mA/cm².

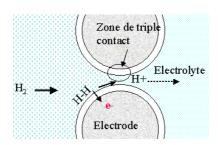
Le rendement théorique "rev" est de 0,936, Le rendement "électrique": 0,60, Le rendement faradique: 1, Le rendement matière peu être pris égal à 0,9, Le rendement système de 0,8.

Ceci donne un rendement total de: 40,4%.

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes. Le coeur de la pile est constitué :

- des électrodes.
- de l'électrolyte,
- des backings (couche de diffusion entourant les électrodes),
- des plaques bipolaires.

L'agencement exact de ces composants entre eux ainsi que la nature des composants les constituant dépend du type de pile. Leur rôle reste cependant le même. Les deux réactions d'oxydo-réduction se font dans la zone dite de "contact triple". Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone que l'on peut voir comme un espace à deux dimensions est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.



Zone de triple contact Les électrodes

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques: une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions ont normalement une cinétique très lente, qui dépend de

plus de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent. Pour que l'hydrogène (ou tout autre carburant) soit oxydé, un catalyseur est nécessaire. De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter

Une température plus élevée permet en théorie de faciliter ces échanges, mais cela impose des contraintes sur les matériaux (électrolyte). Une pression plus élevée augmente la vitesse des réactions, néanmoins elle ne peut être indéfiniment augmentée à cause de la demande pour le compresseur.

2) Exemple de projet d'électrification décentralisée dimensionné par HOMER



Les Îles Chiloe sont localisées de la Côte du Pacifique du Chili du Sud. De plus de 40 îles dans le groupe, 32 sont trop loin de la côte pour être connectées au continent sur le réseau électrique et avoir accès à l'électricité, où l'accès est intermittent fourni par des générateurs diesel. Les îles s'étendent dans la taille de 12 à 450 maisons, avec des charges projetées aux limites de 17 à 1004 kWh/jours. L'activité économique dans les îles inclue l'agriculture, la gestion animale et la pêche. NREL, par un accord coopératif entre les gouvernements du Chili et les Etats-Unis, a travaillé avec une équipe d'experts locaux et internationaux pour mettre en oeuvre un système de puissance hybride piloté sur Isla Tac, une des îles Chiloe.

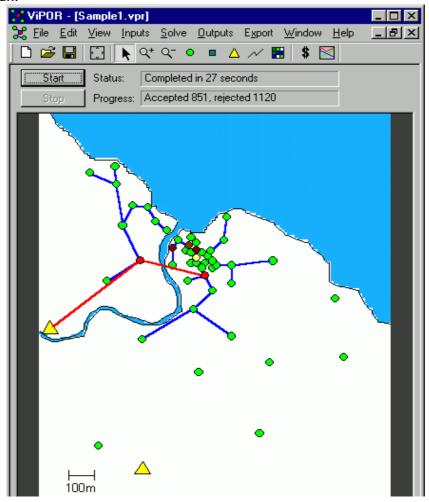
L'analyse d'optimisation d'Ian Baring-GouldAn utilisant HOMER a montré qu'un système diesel-éolien avec le stockage dans les batteries fournies l'énergie exigée par l'île. La capacité d'analyse de sensibilité de HOMER a aidé l'équipe à évaluer l'impact de prix de carburant sur la conception du système. L'équipe a aussi utilisé deux autres modèles NREL : ViPOR pour déterminer des dépenses de mini-réseau de distribution électriques et Hybrid2 pour achever la conception du système de puissance hybride. Ce travail a aidé à pousser à un prêt bancaire de développement multilatéral de 40 millions de \$ à fournir des projets d'électrification ruraux, y compris la reproduction de ce projet pilote, à travers la région d'île Chiloe entière

Le téléchargement HOMER est disponible gratuitement sur le site Web de HOMER, www.nrel.gov/homer



ViPOR est un modèle d'optimisation pour concevoir des systèmes d'électrification de village. Étant donné une carte d'un village et quelques informations sur les charges et des dépenses d'équipement, ViPOR décide quelles maisons devraient être faites pour fonctionner par des systèmes de puissance isolée (comme des systèmes domestiques solaires) et qui devrait être inclus dans un réseau de distribution centralisé. Le réseau de distribution est d'une façon optimale conçue avec la considération de terrain local.

Dans l'exemple montré ci-dessous, ViPOR a voulu inclure la plupart du village dans un réseau de distribution et fournit aux autres des systèmes domestiques solaires. Parce qu'il est plus cher de diriger des fils sur la rivière qu'à travers le terrain ouvert, ViPOR a réduit au minimum des croisements fluviaux.



Chaque point de charge est assigné un type de charge et on peut définir autant de types de charge comme on souhaite. Les types de charge sont vus et édités utilisant la Charge Tape la boîte de

dialogue. Pour chaque type de charge, on spécifie la moyenne la demande quotidiennement électrique.

La taille de la charge sur-réseau est l'utilisation électrique quotidienne à laquelle vous vous attendez pour une charge de ce type qui est connectée au réseau de distribution électrique.

La taille de charge de-réseau est l'utilisation à laquelle vous vous attendez pour une charge de ce type qui est fournie d'un système isolé comme un système domestique solaire. La charge de-réseau est typiquement plus petite que la charge sur-réseau parce que les systèmes isolés sont d'habitude plus limités du montant énergétique qu'ils peuvent fournir.

Des emplacements source sont des sites où un système de puissance centralisé pourrait être placé. Si vous spécifiez plus qu'un emplacement source potentiel, ViPOR choisira l'emplacement optimal. Si approprier, ViPOR choisira plus qu'un emplacement source, chaque approvisionnement un système de distribution séparé.

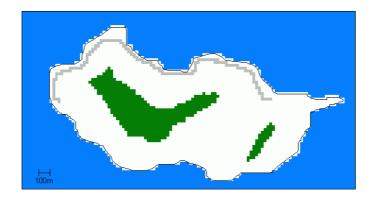
Des emplacements source sont identifiés dans ViPOR par un triangle. Chaque emplacement source est assigné, un type source et son triangle sont colorés selon son type. Dans l'exemple montré, le triangle orange représente un emplacement de vent bas et les deux triangles jaunes représentent des emplacements de vent violent.

Des emplacements sources sont édités à la page de Sources de la boîte de dialogue de Noeuds. Ils peuvent être importés de fichiers texte ou créés en cliquetant sur la carte utilisant l'outil Source s'Ajoutant.

Avant de lancer une simulation, il est nécessaire de rentrer tous les paramètres du terrain, les limites, leurs caractéristiques. Vipor en tiendra compte pour dimensionner le réseau et réduire au maximum les dépenses.

Les considérations de terrain sont d'habitude importantes dans la détermination de la disposition optimale d'un réseau de distribution. Dans ViPOR, le terrain est inclus dans l'analyse en définissant un réseau de terrain d'une résolution particulière et assignant ensuite un multiplicateur de coût de terrain à chaque cellule de réseau. Vous pouvez créer n'importe quel type de terrain et spécifier un multiplicateur de coût de terrain et une couleur pour chacun. Alors vous assignez un type de terrain à chaque cellule de réseau. Dans l'exemple suivant, quatre types de terrain ont été identifiés : l'eau (bleu) est extrêmement chère, forestier (vert) est modérément cher, la prairie (blanc) est moins chère que la forêt et le secteur le long d'une traînée(trace) existante (gris) est le moins cher.

Pour assigner un type de terrain à une cellule de réseau particulière, le clic sur l'outil de Terrain se spécifiant, spécifie ensuite quel type de terrain vous voulez assigner. Le curseur changera pour indiquer que vous utilisez l'outil de Terrain se Spécifiant. Maintenant n'importe quelle cellule sur laquelle vous cliquez sera assigner ce type de terrain. Pour désélectionner l'outil de Terrain se Spécifiant, frappez la clef d'Évasion ou le clic à l'extérieur de la carte.

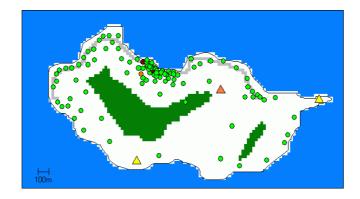


Une fois la typologie du terrain prise en compte, on peut entrer les consommateurs avec leurs caractéristiques et les ressources. Vipor pourra ainsi déterminer le réseau basse ou moyenne tension.

Des emplacements source sont des sites où un système de puissance centralisé pourrait être placé. Si vous spécifiez plus qu'un emplacement source potentiel, ViPOR choisira l'emplacement optimal. Si approprier, ViPOR choisira plus qu'un emplacement source, chaque approvisionnement un système de distribution séparé.

Des emplacements source sont identifiés dans ViPOR par un triangle. Chaque emplacement source est assigné, un type de source et son triangle sont colorés selon son type. Dans l'exemple montré ci-dessous, le triangle orange représente un emplacement de vent bas et les deux triangles jaunes représentent des emplacements de vent violent.

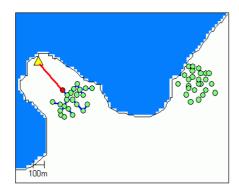
Des emplacements source sont édités à la page de Sources de la boîte de dialogue de Noeuds. Ils peuvent être importés de fichiers texte ou créés en cliquetant sur la carte utilisant l'outil Source s'Ajoutant.

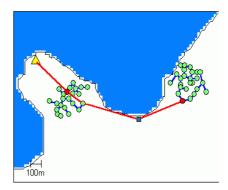


Comme il cherche les emplacements optimaux de transformateurs et des fils, ViPOR n'est pas libre de considérer n'importe quels emplacements qu'il choisit. Au lieu de cela, il est limité à la considération seulement un jeu fixé de points : le jeu de points de charge. Cette limitation augmente énormément la vitesse de la procédure d'optimisation parce que toutes les distances peuvent être calculées d'avance. Et dans la plupart des circonstances ce n'est pas excessivement restrictif. Par exemple, l'emplacement optimal d'un transformateur particulier ne va pas probablement être loin d'un point de charge. Dans quelques circonstances, cependant, cette limitation est trop restrictive

Considérez l'exemple suivant, où une baie sépare deux groupes de maisons. Inclure les deux groupes de maisons dans un réseau de distribution exigerait le croisement de la baie, qui est si chère que ViPOR décide d'exclure le deuxième groupe du réseau. Mais depuis ViPOR peut seulement considérer des laps de temps de fil de point à point, nous devons ajouter un noeud

factice près du bord de la baie pour faire le meilleur itinéraire visible à ViPOR. Avec cette suggestion, ViPOR est capable de trouver une meilleure solution.





4) Dossier Meyer

L'Inventeur STANLEY MEYER Stanley A. Meyer 3792 Broadway, Grove City Ohio 43123 USA

Tél: 1-614-871-4173 et Fax: 1-614-871-8075

http://moteuraeau.free.fr

http://www.wasserauto.de/

Ingénieur en électricité possédant d'une

Avec son frère, ancien ingénieur en électricité de l'USAF, il a

monté une opération de plusieurs millions de dollars dans le domaine du transport et des pièces détachées.

Il avait l'esprit d'entreprise. La technologie Water Fuel Cell (W.F.C., nom de la technologie et de la société de Meyer) est la propriété de Stanley A. Meyer de Grove City dans l'Ohio. De nos jours, la W.F.C. International n'a pas de représentants officiels en Angleterre. Mais, malgré des controverses, au Royaume Uni, des membres du Parlement, des scientifiques du Ministère de la Défense, étudient la W.F.C. de Meyer tout comme de grands groupes industriels et des gouvernements étrangers.

Il a financé seul son travail scientifique, reconnu et récompensé par des organismes nationaux et internationaux, et a été élu inventeur de l'année dans le Who'Who américain de 1993. (Il a ensuite reçu des soutiens substantiels du Canada, d'Angleterre, et de Suède.

LE DECES DE STANLEY MEYELe 29 mars 1998, Eugène Mallove rédacteur en chef de Infinite Energy confirmait sur Internet le décès de Stanley, âgé de 57 ans, après avoir appelé le service de pompes funèbres à Evans (information reprise par W. Bahman de P.A.C.E. et D.V.S.).Le 21 mars, Stanley avait dîné dans un restaurant de Grove City en compagnie d'autres personnes. Il est brusquement sorti de table en disant qu'il avait été empoisonné, puis il a couru vers sa voiture sur le parking et s'est effondré.

Sa famille, sa femme Marylin, son frère jumeau Stefen Foster, un autre frère Henry, sa sœur Barbara Feret, une ribambelle de neveux et nièces, lui même n'ayant pas d'enfants, ont du se résigner à l'absence d'obsèques. Sa dépouille fut emportée pour être autopsiée. Les premières conclusions ont indiqué que sa mort était due à une maladie artérielle, mais comme la maladie incriminée aboutit très rarement à la mort, un autre examen en toxicologie a été ordonné, dont les résultats n'étaient toujours pas communiqués en avril 1998. Inge et Adolf Schneider du NET journal (que nous remercions pour l'autorisation de grande expérience, Stanley travaillait sur la fusion de l'hydrogène à température ambiante.

Il a été l'auteur de divers brevets en océanographie, monitoring cardiaque et systèmes de validation bancaires (42 en tout dont 10 au Canada). Début 1989, il a eu un traitement de faveur au bureau des brevets : certains de ses brevets ont été acceptés en 1993. La plupart d'entre eux font partie de la section 101, où l'accord pour le brevet dépend d'une démonstration réussie. Dans ce bureau les brevets de Meyer furent expédiés en 8 mois, ce qui est un délai court et inouï qui prouve qu'ils ont pensé que cette technologie était importante, d'autant plus que dans d'autres textes il est dit au contraire que 200.000 applications de brevets étaient en attente.

Il a travaillé pour la Fondation Battelle dans l'Ohio, à la mise au point du projet Gemini à la NASA et aussi au système d'alimentation en énergie sur le concept EBED pour le projet Guerre des Etoiles.

Il possédait des sociétés qui fabriquent de tels équipements et il a occupé des fonctions de cosponsoring dans des affaires internationales. publier la photo ci-dessus) avaient rendu visite à Meyer en septembre 1997. Stanley leur avait assuré qu'il avait signé des contrats avec des firmes américaines pour commercialiser sa voiture. Jerry Decker avait appris de Stanley même, rencontré à Denver que sa voiture était presque au point. Il était en bonne santé et plein d'énergie. En mars, il était sur le point d'avoir un grand succès pour la pose de la première pierre d'un centre de recherches de \$50 millions à Grove City. Il est utile de replacer le travail de Meyer dans son contexte historique, car, en fait, on dit "fonctionnant à l'eau" pour parler de véhicules qui, en réalité sont alimentés en hydrogène

La théorie concernant l'énergie de l'eau date de 120 ans. En 1874, Jules Verne avait eu la vision de ce "charbon du futur fournissant sans limites lumière et chaleur à un point tel qu'on ne l'avait jamais rêvé". A la même époque, August Otto, le père du moteur moderne à combustion interne, faisait des expériences avec l'hydrogène qu'il préférait à "l'abominable pétrole". Arrhenius, le grand physicien Scandinave, posait la théorie moléculaire qui régirait la dissociation moléculaire libre que Meyer démontre de nos jours.

L'Amirauté Britannique a expérimenté son premier moteur à eau dans les années 30, sous la direction de l'ingénieur en chef Richmond. Pendant la guerre le gaz de l'eau a été largement utilisé. Dans les années 50 British Petroleum a aussi investi sur cette idée. Vers 1970 Channel Islands a beaucoup parlé d'une Morris Mini Minor fonctionnant à l'eau, mais qui, après de grandes promesses de financement pour sa commercialisation, est rapidement tombée dans l'oubli. Un scientifique d'Europe de l'Est durement éprouvé, Yull Brown (voir son dossier dans le sommaire des Carburants alternatifs) a mis au point un appareil dont le carburant est l'eau. Dans les années 70, l'Assemblée Législative de New South Wales a eu connaissance de l'expérimentation d'une voiture équipée d'un moteur à gaz - eau consommant 3,78 litres aux 1600 km.

Récemment, un jeune Californien a conçu un système simple et bon marché pour les voitures. Après avoir été mis en garde par le DoE de ne pas tenter de commercialiser le dit système (ce qui en démontre la simplicité), il a mis ses plans dans le domaine public. Tous ces véhicules utilisent des systèmes qui produisent le gaz que l'on brûle à bord. Les nouvelles technologies de l'hydrogène produisent 20 à peut-être 1000 fois plus d'énergie que les autres. La Royal Society a examiné un moteur dont l'efficacité est multipliée par un facteur de 4 à 6. Une communication officielle était prévue.

D'autres travaux (cités dans le prochain dossier "Sur la piste de l'Energie Libre...") comme ceux de Roger Billings ou l'"hypercar" de Amory Lovins, convertissent le gaz en électricité. L'amiral Griffin qui avait essayé en vain de perfectionner la voiture à eau du Dr Henry Cornish est donc entré en contact avec Meyer. Il a ainsi pu assister en personne à une de ses démonstrations.

W.F.C. affirme pouvoir remplacer les hydrocarbures utilisés de nos jours. Il suffit de moderniser l'injection des moteurs à combustion internes au moyen d'un contrôle électronique (par puce) simple et peu onéreux. Pour l'automobile, un kit W.F.C. se compose d'injecteurs contrôlés par puces et que l'on peut installer en moins d'une heure en les vissant dans les trous des bougies.

Dans le cas des diesels, des avions et des gros générateurs de courant actuels, des adaptateurs similaires remplaceraient les injecteurs de carburant comme pour les brûleurs industriels. Des outils de soudure fonctionnant avec l'eau sont déjà vendus par plusieurs autres compagnies (Gaz de Brown probablement).

Pour un coût estimé à \$1500, le procédé de Meyer n'est pas cher comparé à celui (\$25.000) nécessité par l'adaptation des véhicules à la batterie - hydrogène. Cette dernière, basée sur une membrane à échange de particules n'est donc pas une technologie convenable pour les pays en voie de développement. De plus, il n'existe pas d'industrie qui fabrique ces batteries.

Meyer a aussi inventé des systèmes autonomes pour le chauffage domestique, et l'industrie, ainsi que pour la production d'eau chaude et de vapeur. Autres retombées de l'application du principe de W.F.C. dessalement de l'eau de mer, traitement des déchets, purification de l'eau (virus et bactéries étant tués par la fréquence et la chaleur) et modules traitant les oxydes et régénérant l'air.

CARACTERE EXCEPTIONNEL DU PROJET W.F.C.

Il ne s'agit pas d'électrolyse classique: il n'y a pas d'électrolyte, pas d'usure discernable d'électrode, pas d'énergie gaspillée en chaleur. En fait, le bénéficiaire de l'énergie surabondante disponible dans l'eau est la santé publique. En effet, selon le US National Board of Standards, l'eau contient 2,5 fois plus d'énergie que le pétrole.

Dans la W.F.C. de Meyer, l'eau est dissociée en gaz au moyen d'une tension électrique produite par des impulsions de courant continu à haut voltage (20 à 40 kV) à la fréquence de 10-15 kHz (d'autres sources Internet donnent 50 Mhz et de moins d'1mA. L'inductance, en série avec la capacité amorce des résonances à l'intérieur de la molécule. Celles-ci ont pour effet de casser les liaisons covalentes entre les atomes d'hydrogène et d'oxygène, en utilisant très peu d'énergie. Les deux gaz ainsi séparés le restent jusqu'à ce qu'une énergie suffisante soit disponible pour les recombiner à nouveau sous forme d'eau. Ces principaux points sont repris pour créer une tension au niveau de la particule.

C'est vraiment l'oscillation de la particule qui joue un rôle de générateur d'énergie.

Meyer dit que, dans un élément d'injection de W.F.C., on a accès à un ZPE supplémentaire. C'est à travers un orifice situé dans le noyau, et que la tension électrique fait ouvrir et fermer que l'on peut faire travailler le ZPE. C'est une impulsion explosive plutôt qu'un éclair d'allumage miniature, qui fait mouvoir les pistons et alimente la transmission normalement tout en produisant seulement de la chaleur et un brouillard d'eau en échappement. Meyer décrit un processus similaire pour la division de molécules d'oxydes d'azote.

On peut atteindre une énergie considérable, dépassant de loin celle de la simple combustion de l'hydrogène. Des brûleurs industriels ont été conçus pour fonctionner au million de BTU/h.

Selon les calculs, la masse de ZPE est de l'ordre de 10 x 1093 gm par cm³. L'énergie qui y est contenue équivaut à 2,5 millions de BTU par gallon d'eau (3,78 l aux USA). Le "vide" à l'intérieur de la molécule est grouillant d'énergie, comme on le sait déjà depuis 1873 avec James Clerk Maxwell et même depuis des milliers d'années dans les sciences orientales et la tradition. La molécule d'eau est l'intermédiaire qui permet de puiser dans l'éther.

TENTATIVES DE PROMOTION DE W.F.C. AU ROYAUME UNIL'amiral Griffin, a été un des premiers à tenter d'obtenir une crédibilité scientifique et un financement industriel pour >une initiative privée d'expérimentation de la technologie W.F.C.. En tant que contrôleur de la Navy, et au nombre des créateurs de la Royal Navy moderne, il était responsable, de la mise en place du plan de développement de la technique basée sur l'hydrogène. Il s'était chargé des applications maritimes de W.F.C. et avait planifié une conversion de la Flotte.

Au premier stade de sa campagne, le but était de convaincre les militaires anglais et les représentants de l'industrie, que la technologie W.F.C. fonctionne, et qu'il était possible de traiter

avec Meyer, celui-ci ayant d'ailleurs donné son accord pour une expérimentation d'un an prévue sur un bateau alimenté à l'eau, aux docks Ste Catherine à Londres.

Pour les articles scientifiques et les voyages des experts chez W.F.C., l'Amiral a dépensé personnellement 30.000 £, et Sebastian de Ferranti 10.000 £ (parmi d'autres sources de financement.) Pendant 6 ans, recherchant soutiens et engagements, l'Amiral Griffin a contacté sans succès plus de 100 départements du gouvernement et une partie des plus grandes industries avant de trouver enfin un commanditaire financier.

La façon dont l'amiral a conduit sa campagne a été soumise à quelques critiques relatives à la faisabilité et aux prétentions du plan initial. Toutefois, cette campagne laisse entendre que l'"Establishment" connaît bien le travail de Meyer. L'agence de recherche de la Défense et le MoD ont montré leur intérêt dans le développement des activités de Meyer.

Une exploitation de la technologie Meyer alliée à une certaine éthique, excluant les applications militaires, recevrait un plus grand soutien international. C'est vers des zones géographiques où existent des besoins majeurs, et pour des buts plus respectables, tels que l'approvisionnement en eau potable et le maintien de l'agriculture indispensable, qu'il faudrait s'engager.

INITIATIVES DANS LE DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE W.F.C.

Meyer était engagé dans la constitution d'un réseau de concessions, et il mettait au point des applications spécifiques sous autorisation de licenceOn dit que des contrats de développement du type "Proof of Concept" portant sur plus de \$200 M sont en cours avec de grands groupes industriels. La NASA et l'USAF ont un accès direct à la technologie de Meyer car ses activités sont soumises à la loi sur la sécurité nationale aux USA. Lors de sa dernière visite chez Meyer, l'Amiral a pu observer le développement des travaux sur un certain nombre de moteurs allant des tondeuses auto portées aux grosses locomotives diesel, en passant par les tracteurs ordinaires.On mentionne aussi dans le bulletin de W.F.C. d'autres initiatives provenant d'autres pays, et, en Amérique, un réseau commercial est prévu pour adapter les systèmes en modernisant les véhicules existants. Il y avait des séminaires réguliers sur les investissements, et Meyer employait des équipes de spécialistes.

Des recherches ont été faites pour établir des centres au dehors de l'Amérique. On a cité le Royaume Uni (jusqu'au décès de l'Amiral) ainsi que la Suède et l'Ukraine. Meyer tient beaucoup à ne pas augmenter les risques de concentration de toute l'activité dans un seul centre. De nombreux organismes, bien connus comme le MITI au Japon et ETZ en Allemagne ont tenté, en vain de reproduire les travaux de Meyer. On dit que Meyer n'a pas produit les articles scientifiques convenant aux revues de ses pairs, ce qui explique que les rapports sur son travail aient été limités. Etant donné la résistance au NET en général et la compétition naturelle dans les domaines de l'énergie, c'est compréhensible. Les brevets US ont été accordés sous la clause d'une "mise en pratique" équivalente, selon Meyer, à des essais indépendants. Il y a eu des controverses dans les médias au sujet de son travail mais pas encore d'enquête véritable et complète. Meyer qui avait trouvé qu'un article paru dans New Energy News était trop partial et déformé a demandé qu'il en soit publié un autre. Les matériels de commercialisation sont avares de détails au sujet des processus impliqués.

On a tenté plusieurs fois d'"acheter" Meyer aussi bien dans son travail que personnellement, et il a été victime de provocations. Il est facile de comprendre sa prudence, car il semble attendre avant d'agir, que se diffuse largement l'idée que l'eau peut être un carburant. Il projette plutôt de contrôler sa technologie pour s'assurer que son invention sera dévolue au bien de l'humanité.

Il existe une vidéo de 1993 de ISNE, présentée par INE. Fin 1995, une compagnie de télévision anglaise, INCA a rendu visite à W.F.C.. L'émission "Ca marche avec de l'eau", commentée par Arthur A. Clarke a été suivie de nombreuses demandes de renseignements, et de visites d'organismes tels le DRA (Ministère de la Défense) et une prestigieuse Université. Un membre de la Chambre des Communes a également contacté W.F.C. et suit ses progrès.

Stanley Meyer s'était rendu en Angleterre et dans certains pays d'Europe en Octobre 96. Il avait exposé à plusieurs industriels la viabilité de la technologie W.F.C.. De nombreux contrats "Proof of Concept" ont concerné les domaines de l'aviation, l'agriculture, du chauffage domestique et industriel, des transports par voies de terre et maritime (en particulier la technologie Hyperdrive ® qui concerne essentiellement un sous-marin de pointe.)

ARTICLES DE JOURNAUX SCIENTIFIQUES ET UNIVERSITAIRES Voici de nombreuses confirmations basées sur des essais dans des laboratoires gouvernementaux et universitaires.

28 ème IECEC Intersociety Energy Conversion Engineering Conférence, août 1993 : "démonstrations répétées devant de nombreux témoins "...

Aeronautic and Space Administration (NASA) Documentation : "utilité de ce procédé pour l'aéronautique "...

Ray Bachnak, Docteur en physique, Professeur et Président de Electronic Engineering Technology, Franklin University, Columbus, Ohio 1996 : " le circuit VIC ® doit accomplir la fonction prévue "...

Dr. T. Nagypal, Professeur à l'Université de Vienne, et Ingénieur consultant dans l'Industrie : mais votre théorie fonctionne...l'efficacité est de 300 % "...

Rea O' Neill, Professeur de technologie scientifique, Institut de technologie de Dublin, Irlande : "c'est une méthode assurément différente du processus d'électrolyse classique, c'est une technologie qui pourra fournir aux véhicules un carburant alternatif dans un proche futur "...

Amiral Sir Anthony Griffin, Contrôleur de la British Navy (en retraite), Rapport Perkins, 1993 : "L'Université du Sussex a réussi à produire de l'hydrogène à partir d'une installation de montage expérimentale basée sur les circuits de Meyer"...

Professeur Robert Bailey, Département d'Ingénierie Mécanique, Université d'Etat de l'Ohio, Grove City, dans un article du 06/03/1996 intitulé: "Intervention divine" : "Il n'y a aucun doute: cela fonctionne "...

Paul Czysz, Professeur en Aéronautique, Université de Saint-Louis, consultant auprès de la NASA, Programme Equinoxe de Canal 4, à Londres, émission du 17/12/1995 : "Ca marche avec de l'eau" : "c'est une technologie qui capte manifestement le ZPE "...

Science Explained, le monde de la science au quotidien, Colin, A. Ronan, Editeur général, Copyrighted Science Book, 1993...confirme que l'atome d'oxygène a une charge électrique négative, et que celui d'hydrogène a une charge positive...

Les Notes Cliffs de 1993 de Harold D. Nathan, Docteur en physique, vérifient l'effet de liaison électrovalente inhabituel entre des structures moléculaires gazeuses et liquides dans des équations où chaque groupe d'ions atomiques différents a un symbole de charge électrique positive ou négative.

De nombreux laboratoires indépendants d'universités ont confirmé l'importance de la tension élevée pour un courant faible.

Gary L. Johnson de l'Université d'Etat du Kansas a intitulé son rapport: "Explosions dans l'eau induites par l'électricité". Il y indique qu'il a découvert que la force de l'explosion augmentait avec le voltage et que le volume d'eau diminuait.

Roy Azevedo, Peter Graneau et Charles Millet de l'Université Northeastern, ainsi que Neal Graneau du Collège Royal de Londres ont intitulé leur rapport: "De puissantes explosions de plasma -eau". Ils y confirment des résultats semblables en utilisant un voltage pulsant de 30 à 40 kilovolts.

Les docteurs Ukrainiens Eugene Antonov et Vladimir Dresyiannikov, ont vérifié comme les précédents chercheurs les différents aspects de la technologie brevetée de Meyer.

LES CONTRATS W.F.C.Après des années de recherche et de mise au point, la technologie W.F.C., est arrivée au stade de conception du système et de préfabrication par les premiers financements des contrats W.F.C. Proof of Concepts. Ceci signifie que l'on s'attend à la fabrication prochaine aux normes industrielles, de modules W.F.C..Cependant, il faudra alors que l'eau prenne

l'appellation de carburant, et que la technologie W.F.C. soit testée et certifiée pour l'EPA et convienne aux règlements d'autres gouvernements.

Quand on en sera là, l'objectif de W.F.C. d'utiliser l'eau comme carburant pourra émerger au grand jour. Les concessions W.F.C. prospéreront, et la dépendance aux carburants fossiles touchera à sa fin. C'est une foi qui a animé toutes les démarches de W.F.C.. Après beaucoup de travail, on s'attend à la voir atteindre son but.Le contrat "Proof of Concept", en quatre points, est une sorte de contrat unique qui protège aussi bien W.F.C. que celui à qui il est concédé, utilisateur et / ou compagnie maîtrisant parfaitement une haute technologie.L'Agrément International W.F.C. sur l'accord de contrat désigne les paramètres du système d'énergie à modifier et établit les termes et conditions particulières portant sur la totalité du contrat.Le Contrat de projet W.F.C. International concerne la construction de deux systèmes de kits de prototype W.F.C., aux fins d'essais et de mises au point aux normes industrielles, en vue de la production. W.F.C. fournit au signataire les spécifications de la conception, et celui-ci construit les prototypes. W.F.C. fournit aussi l'interface électronique et le logiciel nécessaires pour lancer les modules.

L'acceptation contractuelle de l'Agrément International de licence de brevet W.F.C., énonce les conditions et les termes pour une licence de fabrication à l'échelle d'une grande distribution W.F.C..

L'Agrément pour contrat de concession industrielle de W.F.C. International, mentionne les termes et les conditions d'une licence de concession industrielle sur une zone géographique donnée. Cette licence n'entrera pas en conflit avec les concessionnaires locaux mais encouragera la croissance des concessions.

W.F.C. soutient de nombreux contrats dans des domaines énergétiques divers dont le premier porte sur le chauffage domestique et industriel ainsi que les transports avec l'important projet Proof of Concept de Résonateur à vapeur industriel W.F.C.® . Ce module peut être adapté sur d'énormes chaudières industrielles et stabiliserait les coûts énergétiques d'un grand nombre d'industries. De plus, il empêche l'eau de geler quand on utilise l'injecteur à carburant eau W.F.C. dans l'application choisie.

DES CONTROVERSES MALHONNETES. DES FREINS...

Récemment, W.F.C. a été déclaré coupable d'une fraude grossière, accusé de ne pas avoir montré quoi que ce soit qui fonctionne, ni de quelconques progrès. Les plaignants étaient des investisseurs d'un programme de carburant concurrent. Aucun des trois témoins "experts "n'avait de références scientifiques et parmi eux, il s'en trouvait deux qui avaient tenté précédemment de prendre la direction de W.F.C.. Lors du procès, le juge a été jusqu'à couper l'enregistrement audio du tribunal pendant une démonstration de la technologie W.F.C..

Meyer (qui depuis 1980 avait dépensé plus de 1,6 millions de dollars) a donc déposé une requête en rejet de la décision de cette cour de justice contre le juge qui a bafoué les lois du Conseil Supérieur de Justice de l'Ohio alors même que la confirmation scientifique se déroule.

Au cours d'une réunion prévue au Parlement britannique, à la Chambre des Lords, Meyer devait parler de la W.F.C. et de la production d'énergie par l'extraction de l'hydrogène de l'eau. Mais cette réunion a été annulée à la dernière minute.

LES AVANTAGES ECOLOGIQUES DE W.F.C.

Le sous-produit de l'injecteur W.F.C. ® est un brouillard d'eau qui retourne à l'environnement, où il recevra à nouveau l'énergie du soleil par absorption de l'énergie photonique. On peut alors recueillir cette eau sous forme de pluie, et la recycler de nouveau dans le moteur, que ce soit en système ouvert ou fermé.

La technologie W.F.C., spécialement conçue pour convenir aux transports, participe à la dépollution de l'atmosphère, en empêchant le prélèvement de l'oxygène nécessaire à la respiration, en éliminant le rejet d'oxydes chimiques dans l'atmosphère, tel qu'il se produit

aujourd'hui avec les combustibles fossiles, en revitalisant les niveaux d'énergie des molécules d'air, et en dissociant les oxydes chimiques déjà présents, depuis 70 ans.

Avec la technologie W.F.C., le moteur à combustion interne, au lieu d'être un système polluant, devient un système purificateur d'air Conscient de cet avertissement et des signes évidents des dangers majeurs encourus par la planète, des chercheurs du monde entier font connaître, grâce à Internet, les avantages de la technologie W.F.C..

L'OSCILLATION DE LA PARTICULE EN TANT QUE GENERATEUR D'ENERGIE.

C'est ainsi que Meyer définit lui-même le processus relatif à la W.F.C. (qui fait l'objet de 26 brevets US et internationaux et dont un plus grand nombre encore sont en cours).

Depuis longtemps les scientifiques ont observé que des atomes stimulés de différentes façons sur des fréquences résonantes particulières provoquent la libération de l'énergie qu'ils contiennent. Thomas Edison en a fait la démonstration en utilisant un flux de courant pour faire osciller les atomes d'un filament dans une ampoule, dans le but de produire une énergie lumineuse. Gordon Gould a utilisé l'oscillation des particules en faisant absorber puis rayonner à nouveau par un atome l'énergie de photons cohérente dans ce que l'on appelle Laser. Le précurseur du Laser, se servait de cette même oscillation avec l'absorption et le re-rayonnement de l'énergie électromagnétique, ce qui donnait la propagation de micro ondes appelée Maser.

Des instruments de musique qui utilisent des caisses de résonance amplifient les ondes sonores, et se servent ainsi également de l'oscillation des particules en absorbant puis ré - émettant à nouveau l'énergie acoustique amplifiée.

On peut s'interroger sur la cause des éclairs ou sur ce qui alimente l'énergie d'un ouragan ou d'une tornade, phénomènes naturels fréquents. Chaque réponse a un point commun : le "fléchissement " ou l'oscillation de la molécule d'eau. L'éclair se produit lorsque le front de l'orage "fléchit " les atomes de molécule d'eau exposés à des nuages d'orage à charge électrique négative.

Le fléchissement de la molécule d'eau présente dans le courant d'air tourbillonnant que constitue un ouragan ou une tornade, libère une énergie énorme qui aide à la formation de l'orage. Une élévation de la température initiale fait tourbillonner l'air, délimitant ainsi une zone d'humidité dans le courant d'air. Le courant tourbillonnant de l'air ascendant crée une tension électrique opposée sur les molécules d'eau qui se trouvent dans l'atmosphère chargée par l'électricité du courant d'air en déplacement. Cette tension "fléchit" électriquement les atomes pour libérer l'énergie qui alimente l'ouragan ou la tornade.

D'OU PROVIENT CETTE ENERGIE ET COMMENT EMANE-T-ELLE DE L'ATOME?

Soumis à une pulsation électrique, un orifice d'énergie, localisé dans le noyau de l'atome, est physiquement contraint à s'ouvrir pour permettre à une plus grande quantité d'énergie de pénétrer dans le spectre d'énergie de l'atome. L'énergie est libérée par l'intermédiaire des atomes dans notre univers. C'est ce qui a été quantifié par l'équation d'Einstein E=mc2. Quand il a élevé au carré la vitesse de la lumière, il s'est aperçu que le potentiel d'énergie lumineuse était plus grand que la troisième dimension dans laquelle nous existons.

Cette énergie universelle ou ZPE, pénètre continuellement dans notre troisième dimension par les orifices d'énergie des atomes. C'est ce qui permet à toutes les structures atomiques de la troisième dimension d'exister ou bien de se maintenir dans un état d'équilibre atomique. S'il n'en était pas ainsi, aucune des formes de vie connues n'existerait. Comment se fait-il qu'une minuscule graine donne un séquoia géant? Comment l'enfant dans le sein de sa mère peut-il subir une structuration atomique pour entretenir la vie? Ni la graine ni la mère ne tirent assez d'énergie du soleil ou de la nourriture pour pouvoir fabriquer ne serait - ce qu'un atome.

Comment l'univers poursuit-il son expansion parallèlement à la création de sa masse physique?Il semble que l'énergie nécessaire à la création de l'univers et de la vie tels que nous les

connaissons émanent du noyau de l'atome, par l'intermédiaire de l'orifice d'énergie. C'est ainsi que tous les atomes fonctionnent en tant que générateurs d'énergie.

Jusqu'ici, il a fallu une grande énergie d'entrée pour que le processus d'oscillation de l'atome libère de l'énergie. C'est ce que démontre avec violence un dispositif thermonucléaire qui ouvre réellement, puis détruit, l'orifice d'énergie des atomes d'uranium 235 et 238.

Mais c'est dans le déclenchement de ce processus à un faible niveau énergétique que réside le secret. Le processus devient alors réalisable économiquement, et utilisable par un consommateur moyen. Pour accomplir cet exploit, Meyer a eu l'idée de se servir de champs de voltage de polarité opposée sur la molécule d'eau. Ceci produit une tension électrique qui fait que les atomes de la molécule d'eau dépassent l'état d'équilibre atomique et se dissocient ou se scindent en gaz hydrogène et oxygène.

Aux environs de 40 kilovolts les gaz prennent automatiquement feu, ce qui produit une énergie thermique explosive (gtnt). A de plus hauts voltages, même, et à la fréquence de résonance de la molécule d'eau, l'orifice d'énergie est ouvert et on peut alors voir une libération contrôlée, de fantastiques quantités d'énergie.

Cette méthode ne dépense pas de grandes quantités d'énergie puisque la tension n'est pas consommée dans un circuit électronique. L'énergie n'est ni créée, ni détruite mais libérée à partir de l'atome (voir figure 2)

Meyer appelle ses électrodes des exciteurs, en fait, ce sont des plaques parallèles en acier inox placés en parallèle ou selon un schéma concentrique. La production de gaz semble être inversement proportionnelle à la distance qui les sépare, le brevet indique 1,5 mm pour de bons résultats. La vraie différence réside dans l'alimentation de la batterie pour laquelle Meyer se sert d'une inductance externe qui paraît être en résonance avec la capacité de la batterie - l'eau pure ayant apparemment une constante diélectrique d'environ 5 - ce qui produit un circuit parallèle résonant. Ce circuit est excité par un générateur à impulsion à haute puissance, avec ensemble la capacité de la batterie et une diode de redressement, le tout formant un circuit de pompage de charge.

Selon Harold Aspden, Meyer se sert de tubes métalliques concentriques immergés dans l'eau et renvoie les impulsions entre les tubes ce qui induit des effets de champs rayonnants augmentant vraisemblablement la dissociation ionique des molécules d'eau et produit l'hydrogène et l'oxygène avec l'énergie captée dans l'éther. (New Energy News août 96)

Le développement W.F.C. de la technologie EASER ® maîtrise ensuite cette puissance, sans toutefois détruire l'atome et son orifice d'énergie (voir figure 7).

Cette libération d'énergie dans EASER ® vient de la seule "flexion" de l'atome d'hydrogène (ou de tout autre atome) par des tensions électriques pulsantes dans un environnement de vide. Le EASER ® devient donc ainsi un soleil miniature contrôlable.

L'élément le plus courant sur Terre, l'hydrogène, est le carburant parfait en raison de sa grande énergie et de sa disponibilité. L'atome d'oxygène soutient notre vie. L'eau, combinaison d'hydrogène et d'oxygène, est aussi bien génératrice de vie que purificatrice. Il est donc fort à propos d'utiliser l'eau en tant que source d'énergie propre et recyclable.

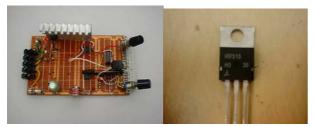
CONFIRMATION DE LA TECHNOLOGIE W.F.C. Depuis 1985, W.F.C. s'est employé à persuader la communauté scientifique de changer sa façon de comprendre la nature de la molécule d'eau et des forces qui agissent sur elle. Il lui fallait comprendre que la molécule d'eau est chargée en dipôle électrique, et qu'il y a là une force d'attraction électrique entre les atomes de charge opposée. Il n'existe pas de force électromagnétique entre les atomes différents de la molécule d'eau, puisque les 8 électrons de l'orbite extérieure "L" des atomes d'oxygène se mettent par paire et tournent dans des directions opposées.

L'orbite "L" de l'atome d'oxygène admet jusqu'à 8 électrons mais pas plus pour la stabilisation de la molécule d'eau. La force d'attraction électrique est équivalente aux deux électrons d'hydrogène

partagés occupant l'orbite "L" de l'atome d'oxygène chargé négativement. Le potentiel de tension appliqué pendant la pulsation de la molécule d'eau n'est pas consommé dans le circuit électronique. Le stress électrique de polarité électrique opposée favorise l'oscillation moléculaire, comme dans un générateur à énergie. Il ne faut qu'une force d'attraction extérieure pour dissocier la molécule d'eau; ce sont les champs de tension opposée agissant sur la molécule d'eau qui sont la cause de ce stress. Finalement, des gouttelettes d'eau peuvent être converties instantanément en énergie thermique explosive (gtnt) à des niveaux de tension plus élevés (jusqu'à 40 kilovolts et plus).

Ses applications sont nombreuses : bains industriels, chauffage des piscines et des serres, chauffage domestique à eau ou à air, injection de vapeur pour détruire les mauvaises herbes.

QUELQUES SIGLES ET ABREVIATIONS		
BTU	Baril Equivalent Pétrole	
DoE	Ministère de l'Energie	
EPA	Ministère de l'Environnement	
gtnt	grammes équivalent tnt	
INE	Institute for New Energy	
ISNE	International symposium for New Energy	
MoD	Ministère de la Défense	
NET	New Energy Technology	
ZPE	Zero Point Energy	



L'oscillateur oscille de 1,3khz à 200khz, il est basé sur le 4069 (à droite)

le signal est ensuite recalibré à l'intérieur de pulsations lentes générées par le 555 (au milieu en haut)

puis il est amplifié par 2 trans 2n2221 et envoyé au mosfet (IRF 510 et non IFR510) Quand au tc4420CPA il est assez dur a trouver.

J'ai rajouté une capa de filtrage (1000mf 25v) et un régulateur 7812 pour les 4069 et 555 Puis les oscillations vers les électrode: j'ai opté pour la solution à base de cylindres concentriques.



Pour le moment, je peux vous dire que ça marche effectivement mais la fréquence n'est pas dans la gamme attendue.

A 5A, la production n'est pas suffisante pour un moteur de voiture mais on peut s'en servir en diminuer appoint la consommation pense que cela vient de mes electrodes qui sont trop éloignées (4.9mm) Je les rapproche, le courant va forcément revanche. si on augmenter. La solution est donc d'intercaler un transfo de sortie (voir brevet MEYER), accordé sur la f de résonnance netre 10 et 15 khz (suivant la surface et l'écartement des electrodes) Sinon, le TC40440 est disponible chez JMB electronique. L'expé en cours: remarquez le module de puissance, maintenant en sortie sur IRF640, entre le générateur d'impulsions et le bocal à électrodes.Les électrodes optimisées (Merci à Claude "géotrouvetout"de Saint André de Cubzac)

Est ce que le type d'inox a une importance?	Non pourvu que ce soit de l'inox.		
Est ce que la tension ou l'intensité a une importance?	A partir d'un certain seuil, c'est le front descendant de l'impulsion qui a le plus d'importance (la rupture), c'est pour cela qu'il faut utiliser des transistors très rapides.		
Si l'on consomme une énergie E à dissocier l'eau, la recombinaison ne pourra, au plus , créer une énergie inférieure ou égale à E (loi de con servation de l'énergie)	Dans une réaction simple c'est vrai, mais ici on fait appel à la résonnance (comme les soldats qui marchent au pas sur un pont suspendu, la résonnance finit par rompre le pont), donc l'énergie déployée n'a rien à voir avec le résultal: elle est incommensurablement plus faible.		
Si c'était si simple, c'aurait déja été fait !!! (Peuchère!)	Ca a déjà été fait, avec des principes quelquefois différents, certains inventeurs sont exilés, d'autres très riches, d'autres encore avec un matelas d'herbe et de terre sur le ventre (de façon prématurée) A voir Meyer par exemple sur le site de Quanthomme. Il y a même une autre façon de produire de l'hydrogène: voir lien vers LAYO.		
Sur internet, on trouve un tas de fréquence de résonnance de l'eau: laquelle est la bonne?	Il y en a plusieurs: de 610 hz, 630 hz, 923hz, 1280hz 24000hz 42800 hz 48000 c'est cette dernière la plus facilement utilisable.(D'ailleurs on commence à trouver des quartz pilepoil sur cette fréquence étonnant non?) Il y a mème une théorie sur le fait d'utiliser 1/7 comme fréquence de base car tout tourne, et 360° est divisible par tous les chiffres de 1 à 9 sauf 7!		
Ou trouver le TC4420CPA ?	(Pub gratuite) entre autres chez JMB Electronique à GAP.		
Est ce que le driver est utile ?	OUI en raison de la chute du front descendant déjà évoqué.		
Quel type de signal à envoyer sinusoïdal, carré, triangulaire?	Carré		
Y a-t-il inversion des électrodes?	Non		
Peut on remplacer les MOSFETS par des IGBT	A condition que le front descendant soit		

	suffisamment "raide".Par contre on peut les remplacer par des Thyratrons.
Est ce que ça marcherait sur un 2 temps?	A priori oui, mais il faut "travailler" l'admission.
C'est quoi le throttle	Un potentiomètre d'entrée de 100k entre 0 et 5v relié à la résistance de 10k avant la borne 3 du 741 (<u>voir schémas</u>)
Esce que ca marche avec de l'eau de mer?	Oui mais attention la résistance est plus faible donc la consommation augmente, (et il fait peut etre changer la fréquence)
Est ce qu'on peut encore améliorer le front descendant?	Oui, en intercalant avant le mosfet un transfo d'impulsion type IT233 ou IT235
Est ce que l'on peut remplacer le driver mosfet?	Oui par deux transistors <u>voir schémas.</u>

