



Agence Régionale de l'Énergie Réunion

Groupe HYDROGENE 2004

Examen des conditions de mise en place d'un réseau démonstratif de cars sur la « Route des Tamarins » en intégrant le projet du futur Tram-Train de l'île de La Réunion

Mai 2004 – Août 2004

Anthony LEFEBURE



« 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

« On dit que l'argent n'a pas d'odeur : le pétrole est là pour le démentir »

Pierre Mac Orlan, 1882 – 1970



Travail effectué avec la collaboration de **Damien Amichaud**

Dernière mise à jour : 03 août 2004

RESUME

L'île de La Réunion, soucieuse de son développement durable et consciente de ses avantages, construit un axe routier majeur et discute de la réalisation d'un Tram-Train respectivement la Route des Tamarins et le TCSP Saint Paul – Saint Benoît.

La technologie Pile à Combustible est déjà utilisée dans plusieurs pays et des réseaux d'autobus existent. Comme le protocole de Kyoto impose aux pays de l'UE de diminuer les émissions de CO₂. et que le transport est la cause de plus de 30% des importations de pétrole en France, il est intéressant de regarder une application concrète de la technologie sur La Réunion. Impliquée dans les énergies renouvelables, l'île pourrait produire elle même son nouveau combustible à partir d'électricité verte et ne plus être dépendante du pétrole.

Le Groupe Hydrogène de l'Agence Régionale de l'Energie Réunion travaille sur plusieurs projets et cherche à rencontrer des partenaires pour présenter les technologies et les différents enjeux de la transition de pétrole/hydrogène.

SUMMARY

The French island of La Reunion (Indian Ocean), worried about its sustainable development and conscious of its advantages, builds a major main highway and discuss the realization of a Tramway respectively the "Road of Tamarins" and the TCSP Saint Paul – Saint Benoit.

Fuel Cell technology is already used in several countries and networks of bus exist. Kyoto imposes to EU country to decrease emissions of CO₂. Transport is the cause of more than 30 % of imports of oil in France, it is interesting to look a concrete application of the technology on Reunion. Involved in renewable energies, the island could produce new fuel (=hydrogen) from green electricity and become completely independent from oil economy.

The Hydrogen Group of the Regional Agency of the Energy Reunion works on several projects and tries to meet partners to present the technologies and the various stakes in the transition of oil/hydrogen.

MOTS-CLES

Hydrogène, Transport, Ile de La Réunion, Développement durable, Pile à Combustible, Autobus, Autocars, Réseaux, Route des Tamarins, Tram-Train

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	5
II. PRESENTATION DE L'ARER	5
1) Organisation générale	5
2) Objectifs	6
3) Plate-Forme Recherche & Développement	7
4) Organigramme	10
III. L'ILE DE LA REUNION	11
1) Présentation de l'île « intense »	11
2) Offre et demande énergétique	12
3) La problématique du transport	12
IV. FILIERE HYDROGENE	15
1) Définition et intérêts	15
2) Applications dans les transports	16
3) Types de piles	21
4) Fonctionnement	23
5) Production d'hydrogène	24
6) Distribution	25
7) Réglementation	26
V. PRINCIPAUX PROJETS DE RESEAUX DANS LE MONDE	27
1) CUTE, STEP et ECTOS	27
2) Programme Japonais	30
VI. LES GRANDS PROJETS REUNIONNAIS	32
1) La « Route des Tamarins »	32
2) Le TCSP Tram-Train	34
VII. ACTEURS DE LA FILIERE	35
1) Mondiaux	35
2) Européens	36
3) Réunionnais	37
VIII. AMBITION D'UNE AGENCE DE L'HYDROGENE	38
1) Perspectives et organisation	38
2) Recherches partenariales	39
IX. PREMIER DIMENSIONNEMENT	40
1) Problématiques	40
2) Hypothèses	45
3) Estimation	46
4) Conséquences	47
X. CONCLUSION	48

I. INTRODUCTION

Les problèmes environnementaux et économiques liés au pétrole sont nombreux et malgré cela la dépendance à ce combustible est quasi mondiale. L'Islande vient d'annoncer son changement de politique énergétique en ne basant plus son économie sur les combustibles fossiles mais sur l'hydrogène et les énergies renouvelables (géothermie et hydraulique). D'autres régions du monde développent des projets exploitant l'hydrogène.

L'intérêt majeur de l'hydrogène réside dans son abondance, la masse de l'Univers est constitué à 90% des atomes H. De plus, sa réaction (combustion ou pile à combustible) est totalement propre : le produit de la réaction est de l'eau (vapeur ou liquide).

Cette technologie s'applique parfaitement dans le domaine des transports car il peut être transporté aisément (par route, mer, gazoduc,...).

Il est clair qu'à la fin de l'ère du pétrole, l'hydrogène sera le seul combustible employé pour les systèmes instationnaires (ARIANE V décolle déjà avec de l'hydrogène liquide).

Beaucoup d'études et de projets apparaissent, tous conscients des avantages écologiques de cette filière mais aussi économiques. Les acteurs précurseurs dans une nouvelle technologie deviennent inévitables par la suite.

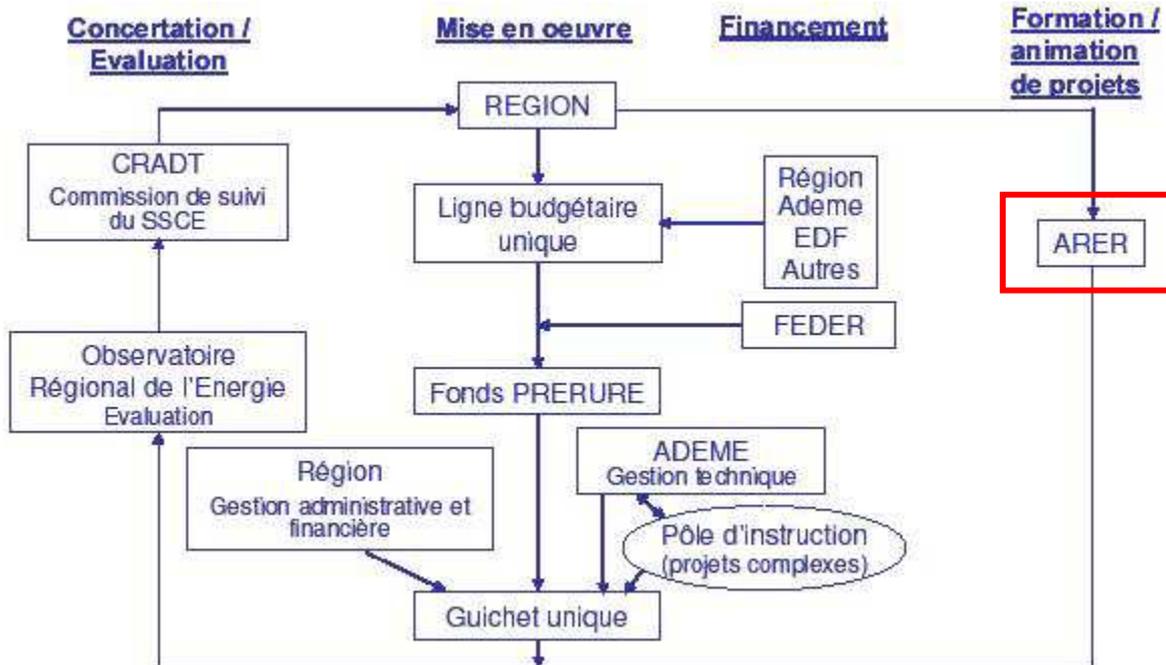
L'Agence Régionale de l'Energie Réunion est une structure engagée dans les problèmes de l'énergie et consciente de l'importance de l'hydrogène dans les transports. Elle se veut fondatrice dans le domaine et agit pour le développement d'une agence réunionnaise de l'hydrogène. Un groupe de cinq stagiaires travaillent sur l'ensemble de la filière et sur des projets précis pour la plate-forme 2004.

On s'intéressera dans un premier temps à présenter l'Agence et à faire une présentation de l'île de La Réunion. Puis un état de l'art des technologies et des projets permettra de mettre en valeur l'intérêt et l'envergure de cette filière. Ensuite une présentation des deux projets de transport (Route des Tamarins et Tram-Train) soulignera les priorités de l'île en matière de déplacements. Après une présentation des ambitions et activités du groupe HYDROGENE, la dernière partie montrera un exemple concret de pré-dimensionnement d'une ligne d'autocars réunionnaise.

II. PRESENTATION DE L'ARER

1) Organisation générale

Le PRERURE (Plan énergétique Régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie) définit sur une période de vingt-cinq ans le contenu d'une politique de demande et d'offre énergétique centrée sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la valorisation des énergies renouvelables disponibles à la Réunion. Le schéma organisationnel de PRERURE est le suivant :



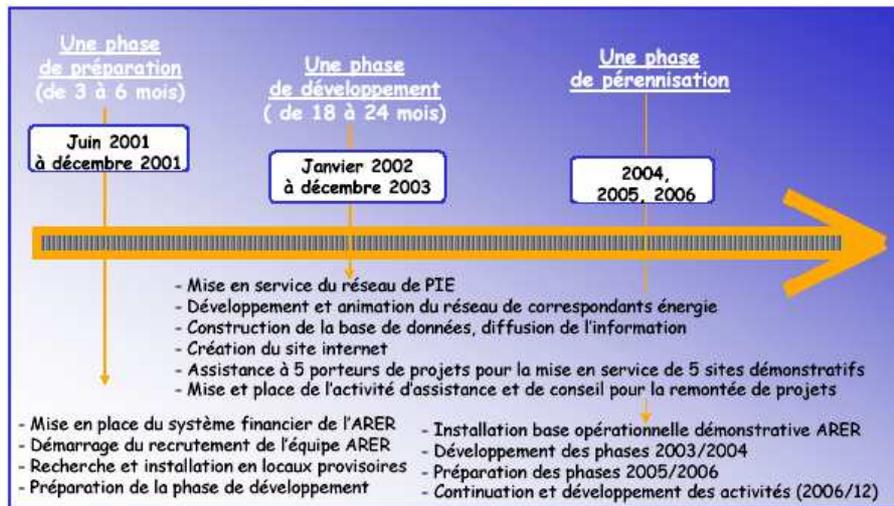
L'ARER est une association loi 1901 financée en 2003 par la Région Réunion, EDF, l'ADEME, le CESR, le CCEE, le SIDELEC et la Commune de Saint-Leu, dont le but est de promouvoir les énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie sur l'île de La Réunion, notamment en valorisant les filières de formation.

2) Objectifs

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.

L'ARER est une nouvelle structure, elle sera mature en 2006. Quatre agences de l'énergie et un siège social seront alors présents sur l'île. Le siège social est localisé à Saint Pierre et deux agences (nord et sud) sont d'ores et déjà ouvertes.



Calendrier de développement de l'ARER

3) Plate-Forme Recherche & Développement

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 diagnostique, phase propositions, et phase de rédaction finalisée.

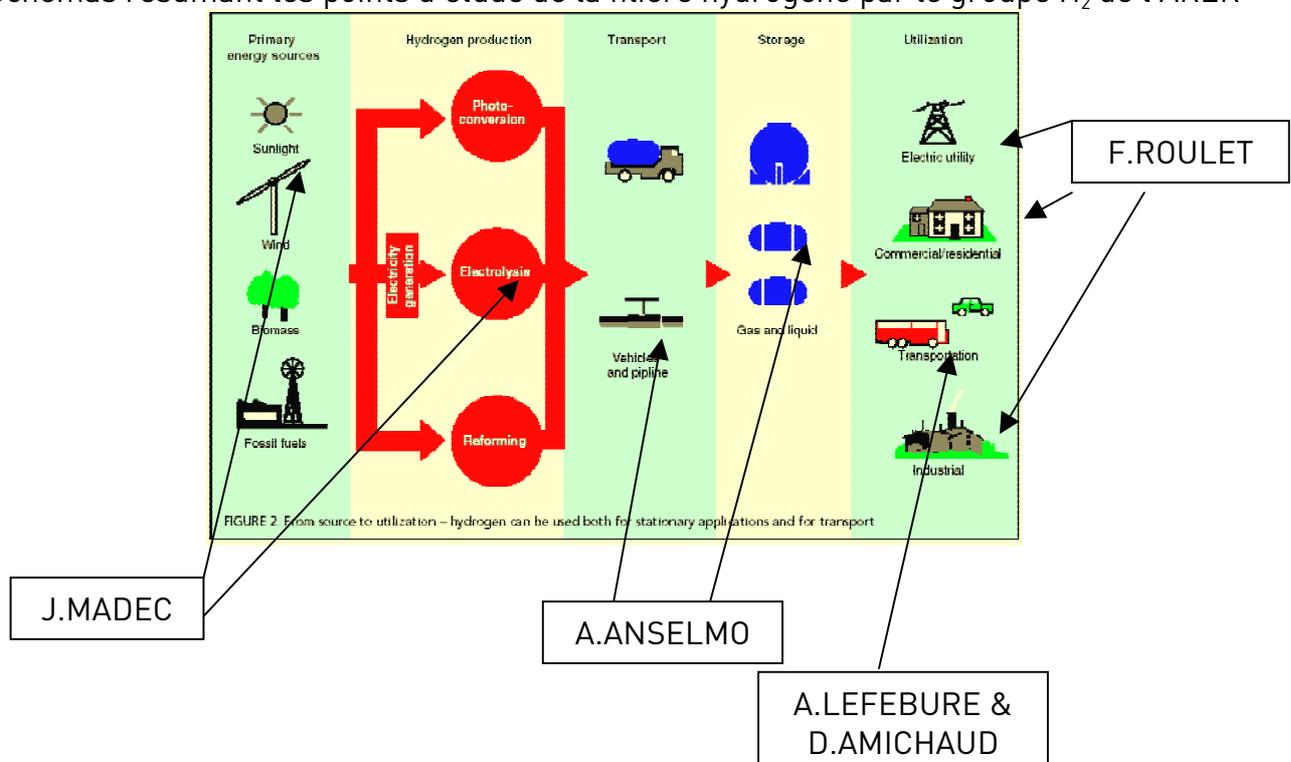
L'ARER recrute des stagiaires chaque année et les sujets de l'année 2004 sont les suivants :

- **Energie grise**, filières technologies Energie et impact environnemental (2004)
- La **Maison Solaire** pour le développement durable de l'île (2003-2004)
- **Fiscalité réunionnaise** favorable aux énergies propres(2004)
- **Géothermie** - accompagnement des processus de micro-forage d'exploration de la ressource géothermale à l'île de la Réunion (2004)
- **Gratte-ciel en construction durable**, programmation technique et financière de l'énergie pour la construction bioclimatique et la gestion des utilités eaux, déchets et énergies (2004)
- **Stratégie** pour la gestion *patrimoniale énergétique des bâtiments de l'aéroport Roland Garros* à Sainte Marie à l'île de la Réunion (2004)
- **Stratégie énergétique et énergie des vagues** pour les aménagements littoraux et portuaires à l'île de la Réunion (2004)
- Grande ferme solaire photovoltaïque connectée au réseau EDF(2004)
- **Logistique "Energie propre et durable"** pour les premiers secours humanitaires et les processus de reconstructions
- **Hydrogène** - Production d'hydrogène et d'oxygène fondée sur l'électricité propre et renouvelable et l'électrolyse de l'eau en territoire insulaire (2004)
- **Hydrogène** - Stockage et distribution de l'hydrogène en territoire insulaire(2004)

- **Hydrogène** - Etat de l'art et applications possibles pour les systèmes énergétiques insulaires (2004)
- **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 et analyse des intermodalités avec le TCSP et des funiculaires implantés sur les ensembles urbains de mi-pentes traversés par la " Route des Tamarins " (2004)

On remarque l'importance du groupe hydrogène. Ceci est la conséquence d'un choix censé, visant à privilégier la filière hydrogène. Cette dernière s'avère être le combustible de l'avenir et l'engagement de la Région pour le développement durable de l'île est réel !

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



Le groupe travaille en étroite collaboration et un climat propice à la réflexion s'est installé naturellement. La création de deux logos en début de stage est la conséquence directe de cette entente sincère.



Ce logo représente le groupe hydrogène. Il est présent sur tous les documents diffusés.



Ce logo représente plus spécifiquement la filière transport.

Les stagiaires sont par ailleurs tous appelés à jouer un rôle transversal sur la plateforme stage RD. Rôles et informations sur chaque stagiaire H₂ :

François Roulet : *Premier Coordonnateur*

Mars-Juin 2004
Stage License
IUT Tarbes

Damien Amichaud : *Coordonnateur Groupe Hydrogène*

Mai-Novembre 2004
Stage de fin d'étude
Ecole des Mines de Douai

Julien Madec : *Responsable du Business Plan*

Mai-Novembre 2004
Stage de fin d'étude
INSTN Saclay

Alexandre Anselmo : *Responsable Base de Données*

Mai-Novembre 2004
Stage de fin d'étude
INSTN Saclay

Anthony Lefebure : *Directeur Evènementiel*

Mai-Août 2004
Stage 2^{ème} année d'ingénieur
ESTACA Levallois-Perret

4) Organigramme

Agence Régionale de l'Energie Réunion - synoptique

• **Membres de droits :** Région Réunion, ADEME, EDF, CCSR, CCEE, Mairie de Saint-Leu, CIVIS
 • **Membres Associés :** SIDR, SISELEC, Commune de MAMOUZOU, Commune de STE SUZANNE, Commune de SAINTE MARIE, Commune de PETITE ILE, Chambre des Métiers

SAPHIR
 • **Président LARER,** Paul VERGE

Siège Social ARER

Sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie à Terre Sainte, Saint-Pierre - Tél.02 62 38 39 38 – Fax 02 62 96 86 91 – www.arer.org – <http://www.arer.org> - 40 avenue de Soweto, BP 226, 97 456 Saint-Pierre cedex

• Directeur : Christophe RAT
 • Corps de médiateurs mis à disposition par les Communautés d'Agglomération : néant
 • Corps de stagiaires de la Platte Forme Recherche et Développement (PFRD) : Gaëlle GILBOIRE – Brice COMTE – Mathieu ACCAÛBLE

Les centres de ressources du siège en appui aux équipes de secteur

NOS METIERS sont mis en œuvre en s'appuyant sur les Espaces Info.Energie et Développement Durable et leurs équipes associées

Centre de ressource DAF
 Pôle Finances, Ressources Humaines et Droit
 • Assistante administrative et financière : Sabine ROBERT,
 • Consultant : Huitelec Conseils

Centre de ressource TECH LOG
 Pôle Ingénierie et Logistique
 • Assistante administrative et logistique : Line RIVIERE
 • Consultant Informatique : Jérémie HOARAU

Centre de ressource EFM
 Pôle Education Formation Marketing
 • Chargé du secteur EFM : à recruter
 • Assistante administrative et événementielle : Marie TOUVET

EIE Sud « HUB »

Front de mer en face boulevard, 78 Boulevard Hubert de Lisie 97 410 Saint-Pierre – Tél 0262 257 257 – Fax 02 62 38 39 92

Secteur SUD (Territoire CIVIS et CC Sud)

• Responsable de Secteur : à recruter suite Départ Michel VAUDET
 • Responsable Espace Info Energie : Stéphane LEGROS – Technicien Conseil
 • Corps de médiateurs mis à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement:
 • Corps de stagiaires de la Platte Forme Recherche et Développement (PFRD) : François ROULET – Alexandre PAYET – Damien AMICHAUD – Anthony LEFEBURE – Alexandre ANSELMO

EIE Ouest

En cours de création – Equipe basée à HUB

Secteur Ouest (Territoire TCO)

• Responsable de Secteur : Nicolas PICOU – Chargé d'Opération
 • Responsable Espace Info Energie : Willy ARABOUX – Technicien Conseil
 • Corps de médiateurs mis à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement
 • Corps de stagiaires de la Platte Forme Recherche et Développement (PFRD) : Néant

EIE Nord

Maison Régionale des Sciences et des Technologies – Technopôle de Saint-Denis – 100 route de la Rivière Des Pluies – Tél : 02 62 922 921 – Fax : 02 62 97 39 52

Secteur Nord (Territoire CIMOR)

• Responsable de Secteur : Patrice JULLIAN – Chargé d'Opération
 • Responsable Espace Info Energie : Olivier MAILLOT – Technicien Conseil
 • Corps de médiateurs mis à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement
 • Corps de stagiaires de la Platte Forme Recherche et Développement (PFRD) : Vincent HEURTEL – Gilles CARNOY – Mathieu LEVEAU – Paul BYRNE – Kevin GRECET

EIE Est

À créer

Secteur Est (Territoire CREST)

• Responsable de Secteur : A recruter
 • Responsable Espace Info Energie : Olivier MAILLOT – Technicien Conseil
 • Corps de médiateurs mis à disposition par les communautés d'agglomération en cours de recrutement
 • Corps de stagiaires de la Platte Forme Recherche et Développement (PFRD) : Néant

III. L'ILE DE LA REUNION

1) Présentation de l'île « intense »



Situation géographique de la Réunion

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 et Rodrigue. Sa capitale, Saint-Denis, se trouve au nord de l'île. D'origine volcanique, le Piton de la Fournaise est toujours un volcan actif sur l'île.

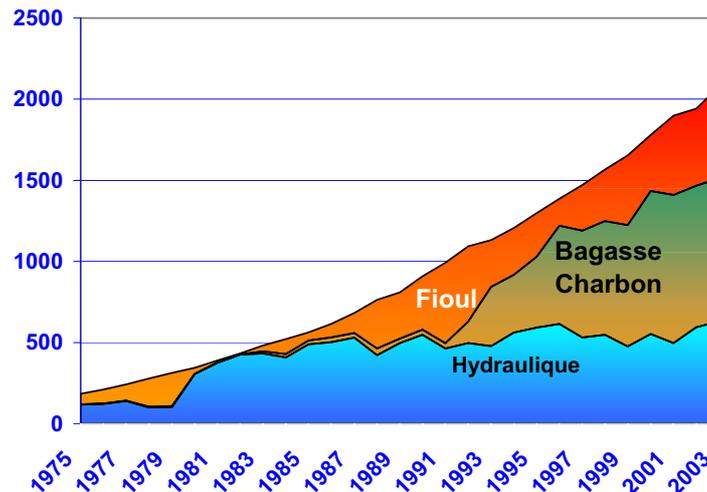
La Réunion, département français depuis 1946, est placée sous l'autorité du Préfet nommé par le gouvernement. Le Préfet est le garant des décisions gouvernementales et de la sécurité du territoire. Il est le représentant de l'Etat dans la Région et le Département. L'île jouit du même régime fiscal, administratif, 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 a 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 fonctionariat 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 !

2) Offre et demande énergétique

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



Progression des sources d'énergies

(Source : E.D.F.)

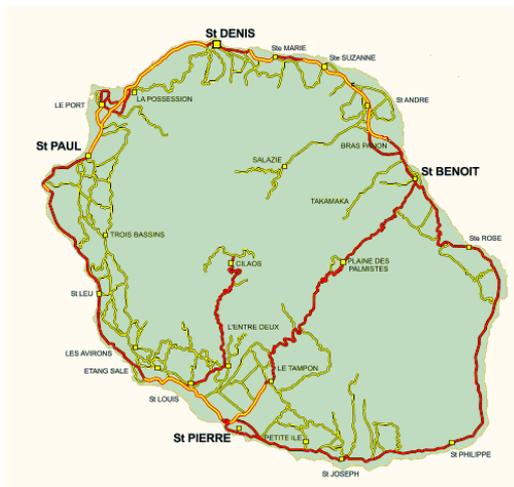
La consommation d'électricité à la Réunion est en hausse régulière de 7 à 8 % par an. Cette augmentation, très rapide, s'explique par la forte croissance démographique et l'augmentation du taux d'équipement des ménages. L'augmentation de l'appel de puissance est de 20 MW par an environ. La production devient problématique, autant à partir des énergies fossiles qu'à partir des énergies renouvelables.

3) La problématique du transport

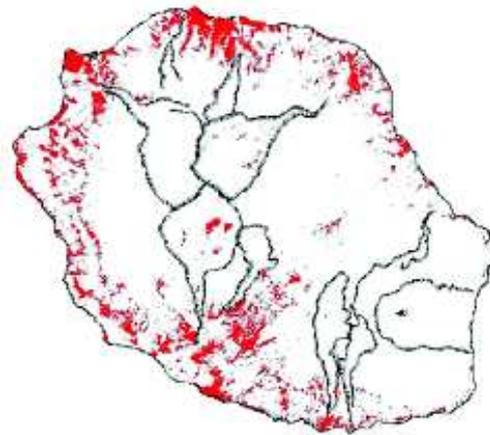
La majorité des déplacements réunionnais se font en automobile. Il existe des réseaux d'autobus et d'autocars mais aucun système ferroviaire n'est présent sur l'île.

➤ *Situation actuelle*

Le chef-lieu Saint Denis est de loin la plus importante devant Saint Paul, Le Port et Saint Pierre. Ces pôles d'activités engrangent un nombre croissant de déplacements interurbains. Malgré les incessantes améliorations du réseau routier, il reste insuffisant pour pallier au nombre de véhicules des heures de pointe.



Structure du réseau routier

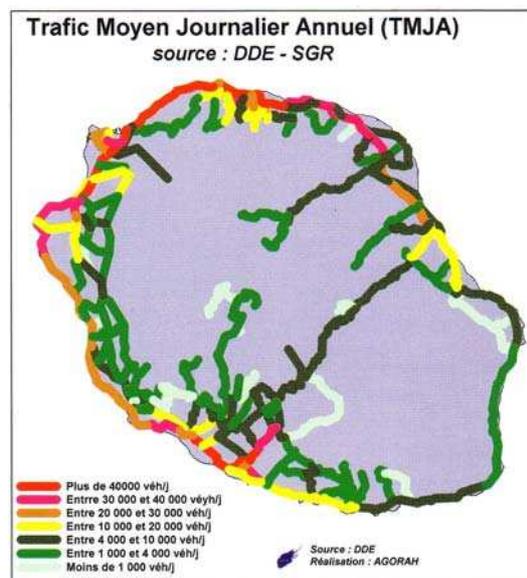


Bassin de population

(Source : DDE)

Aucune autoroute n'existe sur l'île mais il existe des 2x2 voies (limitées à 110km/h) au nord et au sud.

La ville de Saint Paul représente un goulet d'étranglement et d'importants embouteillages perturbent fortement les flux Nord-Sud quotidiens, spécialement aux heures de pointe : matin dans le sens Sud-Nord et soir dans le sens Nord-Sud.

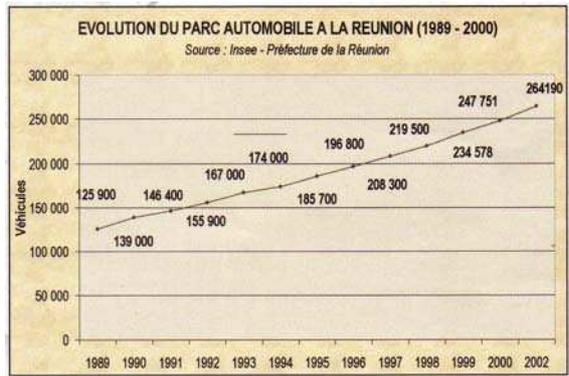


[Réalisée en 2001]

Les transports en commun permettent de diminuer le nombre de véhicule (exemple : un bus équivaut à 45 voitures) mais la voiture reste le moyen mécanique utilisé par 90% de la population pour se rendre sur leur lieu de travail. Il est important de signaler que 42% des déplacements scolaires sont effectués par des autobus ou autocars. Depuis la disparition de la vignette, il est délicat de connaître le parc automobile mais il a doublé entre 1989 et 2000.

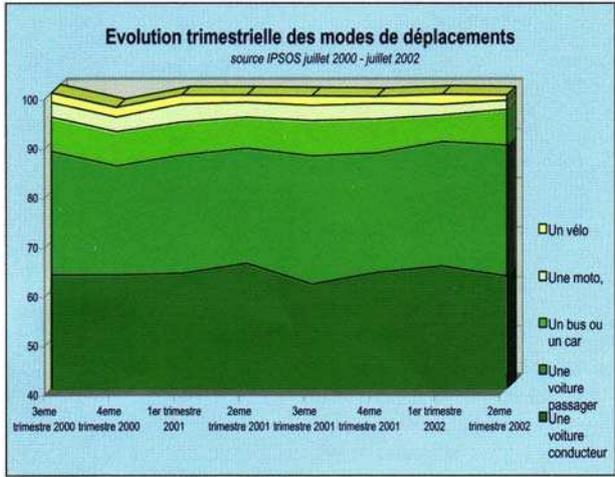
Ce mode de transport privilégié empêche la libre circulation des bus et ne le rend pas plus attractif.

1 voiture pour 3 habitants



(Source : INSEE)

Il existe des réseaux de bus sur l'île mais le *maillage du territoire est complexe* de part la topographie de la Réunion et de dispersion des habitats. La voiture reste le moyen de transport préféré des habitants loin devant les bus/cars ou les deux roues. On estime à 5% la part des déplacements interurbains effectués en transport en commun les jours ouvrés.



(Source : IPSOS)

Sur les réseaux les plus anciens un tassement du recours aux transports en commun a été observé en 2001. Certains réseaux ont cependant connu une hausse significative du nombre de voyages par an et par habitant (St Louis- St Pierre par exemple). Il faut également signaler le succès rencontré par le *TCSP de St Denis*, sur les lignes duquel ont pu être observées des croissances de trafic supérieures à 30 % depuis sa mise en service. Le nombre de voyages par habitant avait progressé sur l'ensemble du **réseau CITALIS**.

Le **réseau Pastel** à St Paul, a connu une légère érosion du nombre de passagers transportés en 2001. Cependant, cette diminution est en grande partie due à l'abandon d'une ligne du réseau.

Le **réseau intercommunal Car Jaune** connaît depuis plusieurs années une diminution régulière de son trafic. Ce réseau utilise les même voies de circulation que le trafic automobile et dépend, pour ses performances, de la fluidité sur le réseau routier. La



dégradation générale des conditions de circulation à la Réunion est en grande partie responsable de la perte d'attractivité du réseau intercommunal auprès des usagers.

➤ *Prévisions*

Population estimée en 2020 : 952 000 habitants (hypothèse *INSEE*)

La transition démographique pour la Réunion est attendue pour l'horizon 2025 avec une population qui dépassera le million d'habitant.

Divers éléments démographiques vont influencer les évolutions pour les transports et les déplacements :

 L'augmentation de la population : augmentation du nombre global de déplacements

 La diminution de la taille des ménages : elle est susceptible d'accentuer considérablement la taille du parc automobile à la Réunion

Le trafic routier a connu **une hausse globale de 4 % entre 2000 et 2001** et cette hausse est équivalente tous les ans. On assiste alors à un doublement du trafic routier tous les 12 ans.

Il est donc nécessaire que les autorités agissent pour améliorer le réseau routier avec des projets d'envergures pour contrer la forte croissance des déplacements.

La « **Route des Tamarins** » (Saint Paul - Etang Salé) et le TCSP **Tram-Train** (Saint Benoit - Saint Paul) représentent à eux seuls les chantiers de premier plan pour les dix prochaines années.

IV. FILIERE HYDROGENE

1) Définition et intérêts

Hydrogène : **n.m.** Corps simple, gazeux, extrêmement léger, c'est le premier élément atomique de la table de MENDELEÏV et le plus abondant de l'Univers.

L'atome d'hydrogène est de nature instable, il cherche toujours à se recombinaison avec un autre atome ou une autre molécule. Par abus de langage on parle de l'hydrogène alors que le combustible est du dihydrogène : H₂.

Cette molécule représente une nouvelle source d'énergie pour les consommateurs de demain. Présent partout, il ne peut pas y avoir de pénurie comme avec le pétrole.

Pour exploiter cette ressource, il existe deux méthodes :
 -le moteur à hydrogène
 -la pile à combustible

Le moteur à hydrogène joue le même rôle qu'un moteur thermique classique : il transforme une énergie chimique en énergie mécanique par combustion. H₂ est très inflammable et sa combustion nécessite une attention très particulière.

La pile à combustible, découverte en 1839, transforme une énergie chimique en énergie électrique. Cette source de courant peut ensuite alimenter un moteur électrique. En théorie, la réaction se produisant au sein d'une pile à combustible (PAC), ne produit que de la vapeur d'eau (eau + chaleur) Son utilisation permet donc une croissance énergétique tout en respectant l'environnement.

La pile à combustible est de part sa simplicité d'utilisation et de ses nombreux avantages, la principale solution pour remplacer les moteurs thermiques classiques dans le domaine des transports.

2) Applications dans les transports

i. Années 60-70

Les premiers engins à être équipés d'une PAC fut des véhicules spatiaux au début des années 60. Le véhicule léger a été la première cible affichée. Ainsi, dès 1967, la société *Union Carbide*, qui développait des piles alcalines, équipa un véhicule de *General Motors* (**Electrovan**) avec une pile de 5 kW puis, en 1970, une **Austin A-40** avec le même type de pile (6 kW).



Electrovan



Austin A-40

ii. Années 90

- Fin 1992, une société canadienne, **Ballard**, lance le premier prototype d'un bus au *BC Transit de Vancouver*. Six de ces bus ont ensuite été utilisés par les villes de Chicago et de Vancouver entre novembre 1998 et novembre 2000. Le Chicago Transit Authority (CTA) et le British Columbia Transit Authority (BCT) ont exploité ces bus afin de tester auprès des passagers leurs comportements et leurs points de vue de ces bus à PAC par rapport aux traditionnels bus diesel. Le bilan fut plus que positif et encouragea les autorités et plus particulièrement les industriels à continuer les efforts dans le développement de cette nouvelle technologie.



Une telle démonstration était alors plus aisée à réussir qu'un véhicule léger, compte tenu de la place disponible et nécessaire pour une technologie à cette époque très encombrante: en effet, près d'un tiers du volume utile du bus était occupé par la pile et ses périphériques.

- En 1994, le bus **TBB-1** (9 mètres - 25 passagers), a démarré ses essais dans l'Université de Georgetown. Deux autres prototypes (**TBB-2** et **TBB-3**) identiques ont été livrés en 1996. Le prototype **TBB-4** de ce projet, de plus grande taille (12 m) a été équipé d'une pile plus puissante et livré en mai 1998. Aucun autre prototype n'a plus été équipé d'une pile de type PAFC.



TBB-1

Après le premier prototype de Ballard en 1992, de nombreux projets ont vu le jour en technologie PEMFC cinq ans plus tard et tous les projets actuels de bus dans le monde ont adopté et adoptent la pile de type PEM, dorénavant plus compacte, à puissance équivalente, que sa concurrente PAFC, même si son coût n'est, aujourd'hui, pas plus attractif.

- Nebus** (présentation en 1997 du New Electric Bus) : prototype de DaimlerChrysler, longueur 12m, équipé d'une pile combustible Ballard de 250 kW et d'un réservoir d'hydrogène sous pression (250 bars) stocké en bouteilles sur le toit, autonomie 250 km et une vitesse de 80km/h. Plus de 12 000 km ont été accumulés sur ce prototype qui est le précurseur du bus *Citaro* des projets CUTE (voir plus loin) et ECTOS (Islande)



- *Bus Oberstdorf* (octobre 1999) : mini-bus **Neoplan** de 8m – 47 passagers, équipé de 3 modules de pile à combustible De Nora pour une puissance totale de 40 kW couplés avec une batterie NiMH et d'un réservoir d'hydrogène sous pression (250 bars) pour une autonomie de 600 km. Ce projet a été co-financé par l'Etat de Bavière (Allemagne).

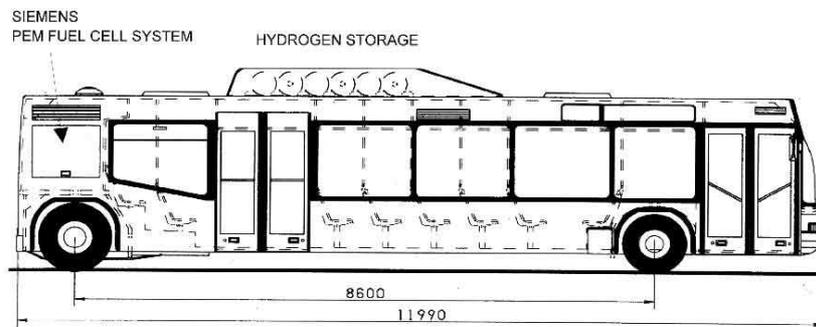


Schéma Neoplan

- Bus **ZEbus** (**Z**ero **E**mission **B**us ou P4) est le successeur du P3. Présenté en 1999 il utilise contrairement au Nébus et au P3 un moteur central qui fournit la puissance de traction aux roues mais aussi la puissance nécessaire aux auxiliaires. Pendant 13 mois il a participé au programme Californien de la ville de Thousands Palms au SunLine Transit Agency.



Sur la photo ci-dessus, les ventilateurs du système de refroidissement sont visibles et en dessous on aperçoit le moteur de traction avec le module de pile à combustible (boîtes noires)

Dans le même temps, les constructeurs développent aussi des automobiles. Ci-dessous, l'évolution des voitures de Daimler-Chrysler :

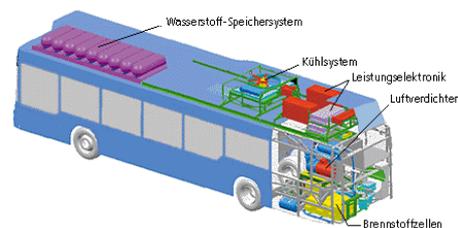


Evolution des voitures Daimler-Chrysler

iii. Années 2000

Après ces premiers prototypes, beaucoup de sociétés entreprennent de réaliser leur propre modèle pour ne pas se faire distancer par les concurrents.

- *Université de Georgetown* (janv. 2000) Bus équipé d'une pile Ballard de 100 kW couplée à une batterie au plomb alimentée par un reformeur de méthanol, le tout alimentant un moteur électrique de 186 kW.
- *City of Erlangen* (mai 2000) : projet commun Siemens, Linde et Man, avec l'aide de l'Etat de Bavière (Allemagne). Début des démonstrations en 2000 dans la ville d'Erlangen avec un bus **MAN** de 12m équipé d'une pile Siemens de 20kW travaillant à basse pression et d'un réservoir d'hydrogène sous pression de 250 bars sur le toit. L'autonomie est de 250-300 km.



- *Projet Bus Bayern II* (mai 2000): il s'agissait d'un bus **Neoplan** de 10,6 m équipé d'une pile **Proton Motors** de 80 kW, hybridée avec un système de récupération à moteur inertiel, et alimentée en hydrogène stocké sous pression pour une autonomie de 150-200 km. Ce projet était co-financé par l'Etat de Bavière.
- *Projet Thor Thunder Power Bus* (2001): Minibus équipé d'une pile UTC Fuel Cells de 60 kW hybridée avec une batterie au plomb et alimentant un moteur électrique de 85 kW. Le carburant hydrogène était stocké sous pression de 250bars pour une autonomie de 320 km.
- **IRISBUS City Class FC**(mai. 2001): d'une longueur de 12m, il est équipé d'une pile de 60 kW développée par UTC Fuel Cells, hybridée avec des batteries au plomb, alimentée en hydrogène stocké sous pression à 200 bars, et alimentant un moteur de 160 kW. Le prototype fonctionne à Turin et un deuxième a été livré en 2003 pour la ville de Milan.



- **Toyota FCHV-BUS1** (juin 2001) : Premier bus présenté par les Japonais. D'une longueur de 10,5 m pour 63 passagers, il est équipé d'une pile « maison » de 90 kW hybridée avec une batterie NiMH, alimentant deux moteurs électriques de 80 kW. L'hydrogène est stocké sous 250 bars, pour une autonomie de 300 km. L'année suivante (octobre 2002), Toyota a annoncé la mise en service réel de 4 bus de la série, en version améliorée (**FCHV-BUS2**) et développée avec sa filiale *Hino Motors Ltd*, équipée d'une pile « maison » de 180 kW hybridée avec une batterie NiMH et alimentée par de l'hydrogène stocké sous pression de 350 bars pour une autonomie de 350 km et une vitesse de 80km/h.



- **China DICP-Bus**: il s'agit d'un prototype développé par un institut chinois et présenté en décembre 2002. Il est équipé d'une petite pile de 30 kW, alimentée en hydrogène sous pression.



- **Bus Citaro** : présenté en 2002, ce bus de conception DaimlerChrysler (voir figure 7), est dans la continuité du **Nebus** (voir ci-dessus). D'une longueur de 12m pour 70 passagers et équipé d'une pile Ballard de 200 kW, il est alimenté en hydrogène stocké sous pression de 350 bars pour une autonomie de 200 km. 9 bouteilles de 45kg chacune contiennent au total 25kg d'hydrogène à 350bars. C'est ce type de bus qui équipera les 9 sites d'essais retenus dans le projet européen CUTE à partir de 2003, ainsi que l'Islande (projet ECTOS).



- Concernant les constructions françaises on retrouve le groupe PSA qui travaille sur le **Taxi PAC** et l'**H₂O**.

Le premier stocke de l'hydrogène et la PAC recharge des batteries Ni-MH.



Taxi PAC

Le second, l' **H₂O**, est une voiture d'intervention pour pompier fonctionnant avec un reformeur (Millenium cell). Une solution aqueuse de borohydrure de sodium permet d'obtenir l'hydrogène donc le problème de stockage ne se pose pas. Il produit ainsi de l'électricité pour se mouvoir et de l'eau. La présence de batteries permet une sécurité supplémentaire.



H₂O

Ces deux automobiles utilisent une PAC de 5.5kW

En annexe A, la liste exhaustive de tous les bus à hydrogène, **page 51 et 52**.

3) Types de piles

On compte actuellement 6 types de pile à combustible:

- **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*).

Leurs caractéristiques expliquent un tel nombre de pile :

	AFC	DMFC	MCFC	PAFC	PEMFC	SOFC
Electrolyte	Potassium hydroxide	Polymer membrane	Immobilised Liquid Molten Carbonate	Immobilised Liquid Phosphoric Acid	Ion Exchange Membrane	Ceramic
Operating Temperature	60-90°C	60-130°C	650°C	200°C	80°C	1,000°C
Efficiency	45-60%	40%	45-60%	35-40%	40-60%	50-65%
Typical Electrical Power	Up to 20 kW	< 10 kW	> 1 MW	> 50 kW	Up to 250 kW	> 200 kW
Possible Applications	Submarines, spacecraft	Portable applications	Power stations	Power stations	Vehicles, small stationary	Power stations

(Source : www.fuelcelltoday.com)

Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%.

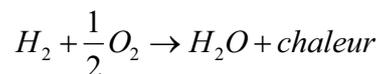
Entre ces divers types, un utilisateur potentiel fera un choix selon les paramètres qui lui sont imposés par son cahier des charges, comme :

- *La température de fonctionnement* : ce choix a des conséquences sur le temps de démarrage et sur le souhait ou non de valoriser la chaleur produite. C'est ainsi qu'on choisit la PEMFC ou l'AFC pour les véhicules automobiles légers, la basse température permettant à la fois un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur par les systèmes classiques actuels. Et c'est ainsi qu'on pourra choisir la SOFC si on veut profiter au mieux de l'énergie résiduelle contenue dans ses rejets gazeux à haute température pour alimenter un cycle thermodynamique aval.
- *Les contraintes de volume et masse* : selon que l'application est mobile (portable, transports) ou fixe (générateurs stationnaires), on peut être amené à faire des choix différents. Par exemple, la PEMFC se présente actuellement comme la plus compacte (2kW/litre et 1,4kW/kg pour la pile seule et 500 W/litre et par kilo environ pour le système générateur électrique complet) et a été ainsi sélectionnée pour la quasi totalité des projets de générateurs mobiles.
- *Le coût attendu* : du fait de son marché potentiel (le transport) et de son fort développement probable, la pile PEMFC sera très vraisemblablement celle qui atteindra les prix les plus bas (on estime généralement que ce prix pourrait atteindre 50 €/kilowatt pour les applications automobiles à durée de vie limitée à 3000 heures et 500-1000 €/kW pour les applications stationnaires à durée de vie supérieure à 30000 heures). Mais d'autres considérations (le coût du système, son intégration dans un process complexe, la nécessité de valoriser les rejets thermiques, la nature du combustible, ...) peuvent conduire à un autre choix de pile à combustible.

La technologie utilisée pour les transports est essentiellement de type PEMFC.

4) Fonctionnement

Transformation d'une énergie chimique en énergie électrique. La réaction se produisant au sein d'une PAC est l'inverse de l'électrolyse de l'eau. Son équation est la suivante :



Cette réaction, en théorie, ne dégage que de la vapeur d'eau. Mais cela signifie que le combustible utilisé est du H_2 pur. La production d' H_2 joue un rôle déterminant sur le côté écologique de l'hydrogène.

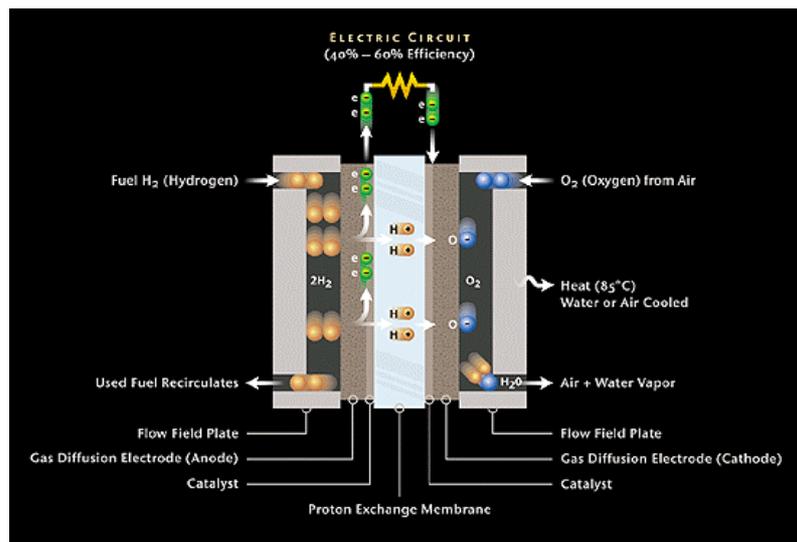


Schéma d'une pile PEMFC

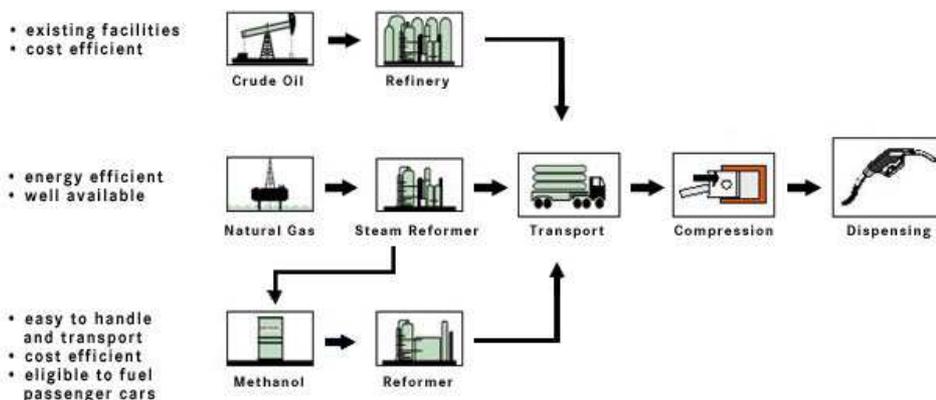
(Source : www.ballard.com/)

La Proton Exchange Membrane (PEM) ne laisse passer que les protons H^+ . De part et d'autre de cette membrane, une anode et une cathode permettent de catalyser respectivement le dihydrogène et le dioxygène. Les électrons libérés se déplacent et créent ainsi un courant électrique. Les ions se recombinent et donnent de l'eau et de la chaleur.

5) Production d'hydrogène

Tout les composés possédant des atomes d'hydrogène, H, sont susceptibles de fournir le combustible. Les recherches sur la production de combustible ont été moindres comparées à celles sur la pile en elle-même. C'est pourquoi les efforts se tournent dorénavant vers ce problème. Il existe de nombreuses origines pour la production : fossile, eau et biomasse. Voici la liste non exhaustive des principales solutions industriellement utilisées :

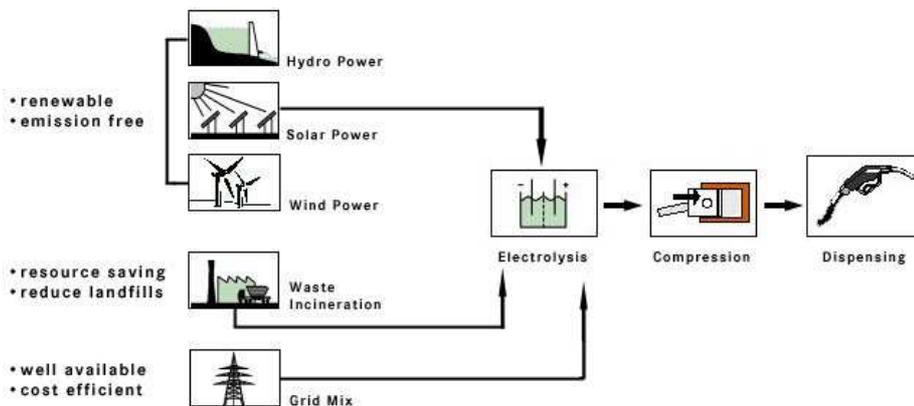
Origine fossile *Vaporéformage du CH₄* : -Consommation de 61kJ/mole H₂
 -Emission de une mole CO₂/mole H₂.



Cycle de production de l'hydrogène d'origine fossile

Origine eau *Electrolyse sous 30 bars* : -Consommation théorique de 282kJ/
 mole

-Emissions dépendent de la provenance de l'électricité : nucléaire, thermique, renouvelable.



Cycle de production de l'hydrogène par électrolyse

Origine biomasse *Gazéification à la vapeur* : -Consommation de 70kJ/mole

-Restitution du CO₂ capté par la croissance de la plante

(Source : CEA)

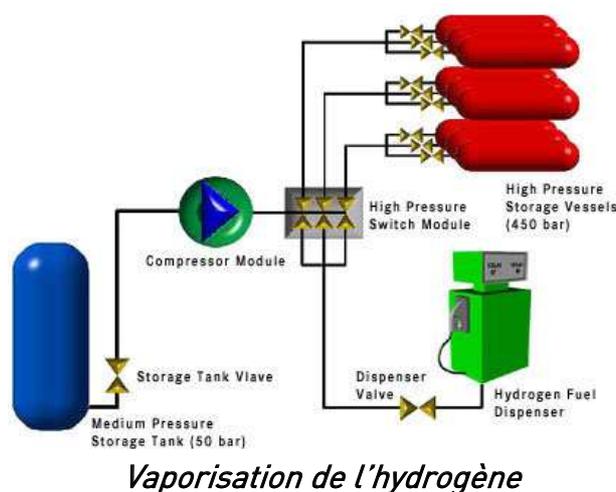
Afin d'obtenir un cycle avec un bilan d'émission de CO₂ nul, il faut utiliser l'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau avec sources renouvelables ou bien d'origine biomasse avec la gazéification de ressource lignocellulosique (bois, bagasse, paille,...).

A titre d'exemple, la société Air Liquide, fournisseur mondial, produit 95% de son H₂ par reformage à la vapeur du gaz naturel CH₄ et 4% par électrolyse de l'eau (Source : IFA)

6) Distribution

Si les méthodes précédentes sont employées par des industriels, elles doivent être associées à un réseau de distribution (type stations service) pour permettre le remplissage des véhicules en combustible.

Les réactions de production se font à des températures élevées par rapport à la température d'ébullition du H₂ qui est de 20K soit -253°C. Le résultat des réactions est sous forme gazeuse mais comme la densité volumique d'énergie est meilleure sous forme liquide alors les stations services préfèrent ce mode de stockage malgré les infrastructures complexes à mettre en œuvre pour la cryogénisation de l'hydrogène. Par contre, le stockage gazeux offre une meilleure densité massique et est préférable pour une utilisation embarquée dans un véhicule. Il doit être stocké avec cette solution sous pression à 350-450 bars.





Stations services en fonctionnement au Luxembourg et à Tokyo

Par contre, certains véhicules (H₂O, Université de Georgetown) utilisent des piles avec un reformeur embarqué. La production d'H₂ se fait donc à flux tendu en fonction de la demande du conducteur.

Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbé dans un hydrure), le combustible utilisé dans une première phase sera peut-être, pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution- un combustible liquide (essence ou gaz naturel, mais probablement pas le méthanol pour des raisons de toxicité) alimentant un reformeur embarqué. On pense généralement que dans la période 2005-2010, les constructeurs vendront à perte pour ouvrir le marché et emmagasiner de l'expérience (comme aujourd'hui Toyota avec son véhicule hybride thermique PRIUS) et que la technologie ne deviendra financièrement rentable qu'à partir de 2010-2015.

7) Réglementation

Incolore, inodore, non corrosive, cette molécule a l'avantage d'être particulièrement énergétique : 1 kg d'H₂ libère environ 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence (soit 120MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence). En revanche, comme l'H₂ est le plus léger des éléments, il occupe, à poids égal, beaucoup plus de volume qu'un autre gaz. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'H₂ comprimé à 700 bars. Ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. Comme de nombreux combustibles, l'H₂ peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air. Il doit donc être utilisé avec précaution. Mais la petitesse de ses molécules lui permet de diffuser très rapidement dans l'air (quatre fois plus vite que le gaz naturel), ce qui est un facteur positif pour la sécurité.

Concernant la législation, les textes de loi sont nombreux puisque la distribution, le transport, les piles, sous pression, liquéfiée, ... les formes de l'hydrogènes sont nombreuses et nécessitent des précautions adaptées (fusibles thermiques, soupapes, etc). Voici une liste des principaux textes de l'Union Européenne : Directive SEVESO II, Directive 97/23/CE, Directive 70/156/CEE, Directive 1999/36/CE et ISO TC 197 dont les normes d'applications (pour les véhicules) en cours d'élaboration devraient être publiées d'ici 2006/2007.

(Source : <http://veille.reseaupaco.org/>)

Les différences entre chaque pays sont aussi importantes, en effet, en France la réglementation est plus sévère et les industriels ont à faire face à différentes stratégies.

V. PRINCIPAUX PROJETS DE RESEAUX DANS LE MONDE

Plusieurs programmes de grandes envergures sont actuellement à l'étude : CUTE, STEP, ECTOS et le programme japonais.

1) CUTE, STEP et ECTOS

Ces trois programmes sont regroupés dans un unique et même club : Fuel Cell Bus Club. Ils sont à l'initiative respectivement de l'Europe, d'Islande et d'Australie

➤ C.U.T.E. (Clean Urban Transport for Europe)



Projet européen consistant à tester 3 bus **Citaro** dans 9 villes. Le but de cette étude est de démontrer la faisabilité d'un système de transport collectif innovant. La production d'hydrogène diffère entre chaque ville et les infrastructures sont testées. Doté de 18.5 millions d'euros par la Commission Européenne, il a débuté en 2001. C'est le premier projet mondial de cette envergure et il montrera, aussi, comment les réglementations des 7 pays concernés seront mises en œuvre.

Récapitulatif de chaque ville:

Villes	Partenaires	Production d'hydrogène	Spécificités
Amsterdam	Hoek Loos, Milieudienst Amsterdam, GVB, Nuon, Shell Hydrogen	Electrolyse à partir de sources renouvelables	Trafic urbain
Barcelone	TMB, BP	Electrolyse en partie de sources renouvelables (solaire)	Climat chaud
Hambourg	HHA Hambourg, HEW, BP	Electrolyse à partir de sources renouvelables	Pas de relief
Londres	London Buses, First, BP	Reformage de combustibles fossiles	Trafic urbain dense, Climat modéré

Luxembourg	Air Liquide, Shell Hydrogen, Ministères de l'Economie et des Transports, FLEAA, AVI Luxembourg	Importation d'H ₂ provenant du reformage de gaz naturel	Trafic urbain
Madrid	Air Liquide, Gaz Natural, Repsol, EMT MadridBP	Reformage de fuel et de gaz naturel	Trafic urbain dense, Climat chaud
Porto	BP, STCP Porto	Reformage de gaz naturel	Typographie vallonnée et climat chaud
Stockholm	SL, Busslink, Ville de Stockholm, Fortum	Electrolyse à partir de sources hydroélectriques	Conditions climatiques froides
Stuttgart	SSB, BP, NWS, Ville de Stuttgart, Switch	Reformage de gaz naturel	Typographie vallonnée
Perth (STEP)	Government of Werstern Australia, Greehouse Office, Environment Australia, Path Transit, UNEP, STEP	Reformage de pétrole	Climat chaud
Reykjavik (ECTOS)	Shell Hydrogen B.V., Shell Iceland, Norsk Hydro ASA,... (voir plus loin)	Electrolyse à partir de sources hydroélectriques et géothermiques	Aucune émission de CO ₂ et conditions climatiques froides



Le bus utilisé par l'ensemble de ces villes est le **Citaro** de Mercedes Benz. Voici ses caractéristiques techniques :

Caractéristiques des bus à pile à combustible :

Masse à vide/maximale	14,2 t/19 t
Dimensions	12,0 m x 2,55 m x 3,67 m
Places assises et debout	max 70
Puissance (kW)	200 kW
Autonomie	200 km
Vitesse max.	80 km/h
Hydrogène pression	350 bar
Hydrogène capacité	40 kg (en 9 bouteilles)

(Source : www.fuel-cell-bus-club.com/)

Historique de CUTE :

- 14 Novembre 2001 : Test du prototype Citaro à Vancouver
- 5 Mai 2003 : Livraison des premier bus à Madrid
- 11 Septembre 2003 : Livraison des bus à Amsterdam
- 15 Septembre 2003 : Livraison des bus à Hambourg
- 22 Septembre 2003 : Livraison des bus à Barcelone
- 11 Novembre 2003 : Livraison des bus à Stuttgart



16 Décembre 2003 : Livraison des bus à Londres

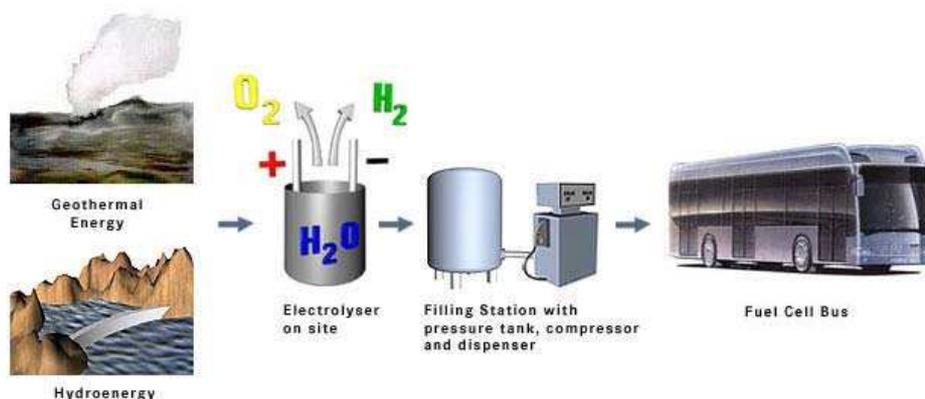
19 Janvier 2004 : Lancement officiel phase 2

14-15 Juin 2004 : Première conférence sur les résultats de la phase 2 de CUTE et ECTOS

➤ E.C.T.O.S. (Ecological City TranspOrt System)

ECTOS

Le but d'ECTOS est de d'installer une plate-forme de démonstration de l'état de l'art de l'hydrogène avec une flotte de bus à pile à combustible circulant dans Reykjavik, Islande. Les sources d'énergies ne dégagent pas de CO₂ car les installations géothermiques et hydroélectriques produisent l'hydrogène par électrolyse. Les principaux objectifs de recherche sont les évolutions des facteurs socio-économiques lorsqu'une société moderne et urbaine change d'énergie de base. ECTOS a démarré le 1^{er} mars 2000. Depuis, 3 bus **Citaro** sont arrivés et en mai 2003, la première station service commerciale délivrant de l'hydrogène s'est ouverte.



Chaîne de l'énergie

➤ S.T.E.P. (Sustainable Transport Energy Project)



Comme le gouvernement australien veut s'engager dans une politique écologique des transports, de nombreuses initiatives sont encouragées par l'Etat. Juillet 2004, Perth accueillera les 3 bus **Citaro** et ils intégreront des lignes normales de la ville. Les bus sont construits dans une usine allemande à Mannheim par EvoBus. BP fournit l'hydrogène qu'elle fabrique par *vaporéformage*. Le but de ces essais est de déterminer

les techniques sensibles, l'environnement, l'économie et les facteurs sociaux que demande l'intégration de bus à pile à combustible.

Le gouvernement et le secteur privé doivent développer l'économie de l'hydrogène. En outre, ces connaissances vont augmenter les opportunités de développement pour les industries australiennes. Le projet sera évalué par sept projets qui vont être indépendamment dirigés par l'Université de Murdoch.



Production du premier bus de Perth en Allemagne

2) Programme Japonais

En juin 2001, Toyota a annoncé le développement d'un bus à pile à combustible de type **hybride** (batterie pour la récupération de l'énergie de freinage). Le premier prototype, baptisé **FCHV-BUS1**, a une autonomie de 300 km et est alimenté en hydrogène sous pression (réservoir sur le toit).

Une version améliorée **FCHV-BUS2** a été construite en collaboration avec la société *Hino Motors Ltd*, en 4 exemplaires (septembre 2002) dont deux circulent sur une ligne régulière, à Tokyo-Yokohama, depuis la fin 2002 (voir figure 2). Cette série est équipée de deux modules PEM de 90 kW chacun, hybridés avec 4 modules de batteries type NiMH. La certification du Ministère des Transports lui permettant de circuler en ville a été obtenue en septembre 2002.

FCHV-BUS1 Main Specifications

Vehicle	Base platform	Hino low-floor city bus HU2PMEE
	Dimensions	10,515(L) x 2,490(W) x 3,360(H) mm
	Maximum speed	Over 80 km/h
	Cruising distance	Over 300 km
	Occupant capacity	63 persons
	Fuel cell stack	Type Polymer electrolyte fuel cell
	Output	90 kW
	Motor	Type Permanent magnet
	Maximum output	80 kW x 2
	Maximum torque	260 Nm x 2
	Fuel	Type Pure hydrogen
	Storing method	High-pressure hydrogen storage tank

Maximum storage pressure	25 MPa (250 atmospheres)
Secondary battery	
Type	Nickel-metal hydride battery

(Source : www.toyota.com/)

En août 2003, un troisième bus a été livré au *Tokyo Metropolitan Government*. Toyota a annoncé, par ailleurs, que huit bus d'une version améliorée transporteront des passagers pendant l'exposition mondiale 2005 à Aichi.



Schéma du FCHV-BUS2

VI. LES GRANDS PROJETS REUNIONNAIS

1) La « Route des Tamarins »

La Route des Tamarins est le plus important projet d'infrastructure routière jamais réalisé à La Réunion.

Au-delà du défi technique et financier, la route constitue un choix d'aménagement fondamental. Son tracé à mi-hauteur assurera une meilleure desserte de l'île. Cette route permettra également le développement des agglomérations de mi-hauteur et favorisera la création d'activités et d'emplois.



Vue aérienne du tracé de la route

Une double vocation : Offrir une nouvelle opportunité de développement pour les Hauts de l'Ouest

Faciliter les déplacements entre St Paul et l'Etang Salé, à plus grande échelle, sur l'axe St Pierre – St Paul.

La route va apporter un nouveau souffle à la circulation dans l'Ouest . Elle offrira un temps de parcours garanti, même aux heures de pointe. A terme, des routes secondaires relieront tous les cinq kilomètres environ au littoral, facilitant les déplacements. Elle sera entièrement gratuite et les points noirs du réseau routier national seront évités : Cap la Houssaye, la Saline, Saint Leu, ...

Elle est un axe majeur de développement économique sur lequel seront directement reliés à Saint Paul, Trois Bassins, Saint Leu, les Avirons, et l 'Etang Salé. Ces communes s'en trouveront ainsi rapprochées, de même que les pôles économiques du Port.



Projet de pont

Le chantier devrait durer au moins quatre ans, pendant lesquels de très nombreuses entreprises réunionnaises seront mises à contribution. En plus des 34 km de 2x2 voies et des 8 échangeurs, il faudra construire plus d'une centaine de ponts dont 4 d'une longueur exceptionnelle (300 à 750m de long). Selon les ratios admis sur ce type de projets, les travaux devraient fournir du travail à 700 personnes environ pendant toute la durée du chantier. La route sera limitée à 90km/h et 110km/h, selon les portions. Les vélos et les cyclomoteurs y seront interdits et il n'y aura aucun carrefour, feux tricolores ou rond-point mais 8 échangeurs dénivelés avec des voies d'accélération et de décélération. Le tracé et les pentes de la route (max. 6% sur la voie d'accélération à Saint Paul) ont été étudiés pour favoriser la sécurité du trafic. La capacité de trafic sera de 35 000 véhicules par jour mais ce nombre sera, d'après les estimations, insuffisant pour satisfaire le nombre de déplacement en 2015.

Coût des travaux :

625 000 000 €

UN PROJET MENÉ ÉTAPE PAR ÉTAPE

- En 1998 : l'Assemblée Plénière du Conseil Régional fait du projet de route pour les Hauts de l'Ouest une priorité.
- En 1999 : les études s'affinent pour élaborer un tracé définitif ;
- Fin 2000 : enquête publique ;
- Fin 2001 : déclaration d'utilité publique ;
- Fin 2002 : premiers coups de pioche ;
- 2004 : mise en service des premiers tronçons ;
- 2006 : mise en service de la liaison

LES CHIFFRES CLÉS

- 34 kilomètres de 2 x 2 voies
- 8 échangeurs
- 1 aire de service
- 4 aires de repos
- 20 minutes entre Saint-Paul et Etang-Salé
- Coût global : environ 4 milliards de francs essentiellement financés par la Région Réunion



Tracé de la Route des Tamarins
(Source : DDE)

Un trafic fluide, c'est l'assurance d'un temps de parcours plus fiable. Saint Paul à Etang Salé en vingt minutes, quelque soit l'heure de la journée.

La construction s'accompagne d'aménagement exemplaires pour lutter contre le bruit et pour protéger l'air et l'eau. La loi contre le bruit impose de respecter 60dB le jour et 55dB la nuit (ambiance d'une case) : implantation de mur acoustique, chaussées étudiées pour que l'ensemble des eaux pluviales soient récupérées et traitées avant de retourner dans la nature (bassin de décantation).

Des paysagistes et des architectes de renom ont commencé à travailler sur le projet routier très en amont des études. L'aménagement paysager a été une priorité. La Route des Tamarins sera incontestablement un atout touristique pour la Réunion. et des

études vont être menées par l'Observatoire Régional de la Qualité de l'Air pour mesurer l'impact de la circulation sur l'atmosphère.

Le projet définitif a été bouclé en 2003. Cette année a été également marquée par l'amorce des acquisitions foncières, le relogement des familles expropriées et le lancement des premiers importants appels d'offres de travaux. Sur la première section de la route des Tamarins sous maîtrise d'œuvre DDE, l'année 2003 a été marquée par l'achèvement du projet routier, s'appuyant, entre autres, sur des terrassements expérimentaux menés dans la savane du Cap la Houssaye ainsi que par le lancement des appels d'offres pour les travaux préparatoires (déviation temporaire de la RN 1 dans le bas de Saint-Paul) et surtout pour les viaducs de Saint-Paul et de la savane du Cap la Houssaye.

Le projet a pris un peu de retard et la mise en service de la liaison devrait être ouverte durant l'année 2008.

Le financement de la Route des Tamarins est assuré par la Région Réunion (fonds d'investissement routier et des transports) et l'Union européenne, dans le cadre du plan de développement régional. Les maîtres d'ouvrage sont la Région Réunion (investisseur), la DDE (route nationale) et l'Europe (FEDER) pour contribution. La maîtrise d'œuvre va être effectuée par la DDE et en majorité par des opérateurs privés.

En annexe B, les Prévisions de trafic en 2015 sur la route du littoral avec et sans Route des Tamarins, **pages 53 et 54**

2) Le TCSP Tram-Train

Ce projet est récent si on compare avec la Route des Tamarins. L'objectif est de relier l'Ouest et l'Est par un système non soumis aux aléas de la circulation tout en conservant un service urbain. La solution du Tram-Train s'est avérée la plus logique : la traversée d'une ville peut se faire par autobus, train, métro ou tramway et les déplacements interurbains par un moyen capable de dépasser une vitesse de 80km/h. Le tramway se retrouve de plus en plus dans les grandes villes car il bénéficie d'un engouement de la part du public. De plus les caractéristiques techniques correspondent aux objectifs de la Région.



Esquisses du tracé du Tram-Train



Actuellement en phase d'étude de faisabilité, ce projet va vraisemblablement voir le jour entre 2010-2015 et reliera les villes de Saint Benoît et Saint Paul. Le tracé n'est pas définie mais les différentes études l'affinent. Des variantes existent pour la desserte de certaines villes en fonction de la configuration urbaine.

Ce projet, lancé par la Région, est mandaté par la société d'économie mixte (S.E.M.) SR21 pour effectuer la maîtrise d'ouvrage. Les études qu'ils effectuent permettent de déterminer les déplacements sur l'île, les aménagements présents, les infrastructures nécessaires pour la mise en place d'un Tram-Train, les plans financiers,...

Un des points particuliers du TCSP est la rupture de charge causée par le changement de moyen de transport au pôle d'échange de Saint Paul.

Un voyageur partant de Saint Leu pour Saint Benoît commence le matin par un autocar pour aller jusqu'à Saint Paul. Il change de moyen de transport à Saint Paul pour prendre le Tram-Train mais cette transition prend un certain temps et rend répulsive l'utilisation des transports en commun. Cette rupture de charge créée à Saint Paul par l'arrivée du Tram-Train et la Route des Tamarins est à prendre en considération et doit être minimisée.

VII. ACTEURS DE LA FILIERE

Entre la production, la distribution, le stockage, les utilisateurs, les autorités, les collectivités,... les acteurs de la filière hydrogène sont nombreux. Le nombre important de stagiaire dans le groupe hydrogène permet de les répartir équitablement selon le sujet de chacun. Ils sont classés en fonction de leur localisation géographique et la liste suivante correspond aux acteurs ciblés à la dernière mise à jour par l'ensemble du groupe H₂.

1) Mondiaux

Localisation	Nom	Type de structure	Intérêt(s) pour le projet
Canada	Stuart Energy	Industriel/Electrolyseurs	Financier et Technique
Norvège	Norsk Hydro Electrolysers	Industriel/Electrolyseurs	Financier et Technique
South Windsor, USA	UTC Fuel cells	Industriel/PAC	Financier et Technique
Bruxelles	European Hydrogen Association	Association	Financier et Technique
Bruxelles	EUCAR	Regroupement d'industriels	Financier
	EUROPE		Financier
Burnaby, Canada	Ballard	Industriel/PAC	Financier



Paris	TOTAL FINA ELF	Producteur et exploitant pétrole	Financier
Bruxelles	Direction générale de l'énergie et des transports		Financier
Hawaii	HAWAII	Collectivité	Technique
Californie, USA	Quantum	Stockage H ₂	Technique
Allemagne	CUTE	Projet Européen	Technique
Islande	ECTOS	Projet Islandais	Technique
Australie	STEP	Projet Australien	Technique

Toutes ces acteurs sont d'importants intervenants dans la filière hydrogène : **CUTE**, **ECTOS** et **STEP** sont des interlocuteurs privilégiés car leurs informations sur leurs réseaux de bus sont nécessaires pour notre projet. L'ARER s'occupe d'un projet de géothermie travaillant étroitement avec l'île d'**HAWAII**. Cette dernière est aussi un des pionniers dans les énergies renouvelables et l'hydrogène. Un partenariat avec cette île volcanique permettrait de consolider nos connaissances et d'accélérer nos avancées. **Stuart Energy**, **Ballard**, **UTC Fuel cells** et **Norsk Hydro Electrolysers** sont des industriels dominants de la filière hydrogène.

2) Européens

Localisation	Nom	Type de structure	Intérêt(s) pour le projet
Paris	EDF	Entreprise fournisseur électricité	Financier et Technique
Lyon	Transénergie	Bureau d'étude	Financier et Technique
Paris et France	CEA	Centre de recherche	Financier et Technique
Paris	Air Liquide	Entreprise fournisseur H ₂	Financier et Technique
dpt 38	IDEA		Financier et Technique
Sassenage, Isère	Axane	Entreprise (PAC)	Financier et Technique
Paris	GDF	Entreprise	Financier et Technique
La Défense	Ministère des transports (national)	Ministère	Financier
Paris	INERIS	Institut études sécuritaires	Technique
Paris	CNRS	Laboratoire	Technique
Sophia Antipolis et Paris	Mines de Paris	Ecole	Technique
Paris	AFH2	Association	Technique
Forbach, Moselle	Association pour La Promotion de l'Hydrogène Et de ses Applications	Association	Technique
Toulouse	Réseau des Agences Régionales de l' Energie et de l' Environnement	Collectivité	Technique
Lyon	RAEE	Agence Régionale	Technique

Lors d'un colloque à Grenoble le 30 mars 2004, tous les acteurs de la filière pile à combustible se sont retrouvés grâce à l'agence **Rhônealpennergie - Environnement**

(RAEE). Suite à cette conférence, beaucoup d'acteurs de la région ont pu être identifiés et contactés pour d'éventuels partenariats. (*En annexe C* : Rapport de mission colloque Grenoble ARER, pages 55-58).

3) Réunionnais

Localisation	Nom	Type de structure	Intérêt(s) pour le projet
Le Port	Air Liquide - SOAR	Entreprise fournisseur H ₂	Financier et Technique
Saint-Denis	EDF	Entreprise fournisseur électricité	Financier et Technique
Saint-Denis	BP Solar	Industriel PV	Financier et Technique
Saint-Denis	Solélec	Industriel PV	Financier et Technique
Saint-Denis	Vergnet Océan Indien	Industriel Eolien	Financier et Technique
Saint-Denis	Région Réunion	Institution	Financier et Technique
Bras Panon	Société Moutoussamy & Fils	Entreprise de cars	Financier et Technique
Saint-Denis	SOTRADER	SEM transport	Financier et Technique
Saint-Denis	SODIPARC	SEM transport	Financier et Technique
Saint-Pierre	SEMITTEL	SEM transport	Financier et Technique
Saint-Louis	Transports Mooland	Entreprise transport	Financier et Technique
Saint-Denis	SARL Moutoussamy Emile	Entreprise de cars	Financier et Technique
Le Port	SRPP	Entreprise importatrice de pétrole	Financier
Sainte-Marie	Groupe Bourbon	Entreprise de transport	Financier
Saint-Denis	Conseil Général (département)	Institution	Financier
Saint-Denis	PARC NATIONAL DES HAUTS		Technique
Saint-Denis	D6-SR21	SEM mandatée pour le Tram-Train	Technique
Saint-Denis	Sciences Reunion	Structure d'animation	Technique
Saint-Denis	S.A Economie Mixte Région Réunion Développement Durable Coopération Régionale (S R 21)	SEM mandatée pour le Tram-Train	Technique
Saint-Denis	DDE Réunion	Ministère	Technique

De nombreux acteurs se trouvent sur l'île et ont tous un rôle important à jouer dans l'élaboration de notre projet. Les sociétés **Sotrader**, **Sodiparc** et **Semittel** sont des opérateurs de transport, c'est à dire qu'ils organisent la gestion des transports. Ils peuvent être propriétaires de quelques bus mais les entreprises comme **Transports Mooland**, **Moutoussamy Emile** et **Société Moutoussamy & Fils** sont des propriétaires d'autobus, autocars et chauffeurs.

Le **Groupe Bourbon** et la **Société Réunionnaise de Produits Pétroliers** sont d'importants employeurs sur l'île et leur soutien morale voire financier permettrait de subvenir à nos besoins.

L'étude de funiculaires reliant la Route des Tamarins au Parc National des Hauts ne peut se faire sans une prise de contact avec ce dernier.

La **DDE** et la **SR21** sont deux structures nécessaires pour obtenir des informations sur l'état d'avancement des projets Tram-Train et Route des Tamarins.

VIII. AMBITION D'UNE AGENCE DE L'HYDROGENE

L'avenir énergétique de l'île passe par l'Agence Régionale de l'Energie Réunion. Le rôle et les ambitions de l'ARER montent en charge d'année en année. Le point critique des demandes énergétiques est le transport. Celui ci représente en général 30% des consommations énergétique. Et l'avenir des transports se fera par l'intermédiaire de l'hydrogène. Les combustibles fossiles sont en nombre limités sur Terre et le seul vecteur énergétique disponible sera essentiellement l'hydrogène (cf. : Notion de « peak oil » et « Rejet CO2 avec hydrogène » en annexe)

1) Perspectives et organisation

Une Agence de l'Hydrogène doit se construire pour pérenniser le travail du groupe HYDROGENE 2004. Il faut qu'une équipe se crée avec un responsable et des stagiaires spécialisés dans la filière. La pré-étude du Business Plan est le suivant :

BILAN PREVISIONNEL DES DEPENSES THEME : FILIERE HYDROGENE

Date : année 2005

DEPENSES		
DEPENSES ARER		
Date	Libellé	Dépenses prévisionnelles
CHARGES SALARIALES		39 925,00 €
	1 CDD d'1 an pour 1ingénieur (charges comprises)	30 185,00 €
	1 téléphone portable	360,00 €
	1 ordinateur	1 500,00 €
	1 véhicule de fonction (location +assurance, essence, révision, réparation)	6 980,00 €
	Forfait déplacement-repas	900,00 €
STAGIAIRES		8 840,00 €
	4 conventions pour stagiaires (durée 6 mois)	7 200,00 €
	4 forfaits déplacements	840,00 €
	4 forfaits Repas	800,00 €
	Primes?	
FONCTIONNEMENT DU LIEU DE TRAVAIL		4 500,00 €
	Matériels de bureau	1 000,00 €
	Fonds de documentation	1 500,00 €
	Fournitures	2 000,00 €
TOTAL		53 265,00 €



ANNEE	Dépenses
2005	53 265,00 €
2006	50 765,00 €
2007	48 555,00 €
2008	48 555,00 €
TOTAL	201 140,00 €

Une pré-étude de Work Plan a été réalisée par l'équipe. Tout le projet de réseau de cars démonstratif est différencié en plusieurs phases.

Mise à jour 26/07/2004	WORKPLAN RESEAU DE BUS A HYDROGENE	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
WP1	Définition du projet, Etude et Recherche de partenariats	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP2	Design et dimensionnement : Production d'électricité à partir de PV + Eolien	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP3	Design et dimensionnement : Electrolyseur, Stockage d'hydrogène et Centrales de distribution	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP4	Coordination avec les réseaux et EVOTRANS, Commande des bus à hydrogène	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP5	Coordination et lancement du réseau démonstratif	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP6	Maintenance et suivi	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP7	Rapport d'étude	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

L'objectif du BP et du WP est de présenter aux différents acteurs une synthèse du premier travail effectué par le Groupe HYDROGENE 2004.

2) Recherches partenariales

Une des actions clé du groupe est la recherche de partenaires. En effet, les moyens pour développer un tel projet sont utiles si le nombre de soutiens est important. Tant au niveau logistique/technique qu'au niveau financier, nous sommes désireux d'entretenir des accords et des partenariats pour appuyer et renforcer nos actions.

Le premier contact avec les acteurs se fait par lettre. Après avoir confirmé la réception du courrier, nous leur proposons une prise de rendez-vous. Plusieurs entretiens ont déjà été obtenus ; les informations récoltées et les discussions nous encouragent à persévérer. Nous sommes déjà en contact avec l'île d'Hawaii et le groupe Transports Mooland.

IX. PREMIER DIMENSIONNEMENT

Un dimensionnement demande beaucoup de travail et nécessite une importante quantité de données et il faut aussi se fixer des objectifs (fréquence des cars, taille,...). Nous cherchons ici le volume de combustible journalier pour faire tourner la flotte de cars. Ce travail touche l'ensemble du Groupe Hydrogène, de la production à l'utilisation.

1) Problématiques

i. Autobus/autocars

Les autobus et autocars transportent des passagers d'un point à un autre. Mais leurs caractéristiques sont différentes.



	AUTOCAR	AUTOBUS
Réseau	Interurbain	Urbain
Fréquences	Faibles	Elevées
Interdistances	Plusieurs km	400m en moy
Vmax (km/h) (+10t)	90-110	60-80
Encombrement	Grand	Optimisé (hauteur)
Nombre de passagers	~50	~70
Position des passagers	Assis (+ceinture)	Assis et debout
Soute à bagages	Oui	Non
Structure dédoublées	A étage	A soufflet
Plancher	Haut	Bas
Accès PMR	Non	Possible

Il n'existe pas sur le marché d'autocars à hydrogène, les seuls disponibles actuellement sont des autobus avec pile à combustible (voir IV - 2) - *iii*). Les réseaux urbains sont plus visibles et plus fréquentés donc pour une première apparition de la technologie PAC ils semblent être parfait pour les tester dans un environnement contraignant (trafic, topographie, climat,...) tout en faisant connaître le produit aux futurs utilisateurs.

Un car à hydrogène est tout à fait envisageable puisque il est techniquement plus difficile de construire un bus à hydrogène (encombrement, réglementation urbaine différente,...). Son apparition devrait se faire dans les prochaines années.

ii. Réseaux à la Réunion

L'organisation administrative de l'île, présente, comme tous les DOM, la particularité d'avoir, sur un même territoire, Région et Département. La **Région** a compétence sur les lignes routières régulières interdépartementales et sur le transport ferroviaire régional. Le **Département** est l'Autorité Organisatrice des Transports Non Urbains. Il a compétence pour organiser les services de transports publics routiers en dehors des Périmètres de Transport Urbain (PTU) y compris les services scolaires, sur son territoire. Les **communes** ou **groupements de communes** (*CINOR, TCO, CIREST, CIVIS, CCSUD*) qui ont institué un PTU, sont devenues autorités organisatrices des transports publics urbains de personnes sur leur territoire (y compris le transport scolaires).

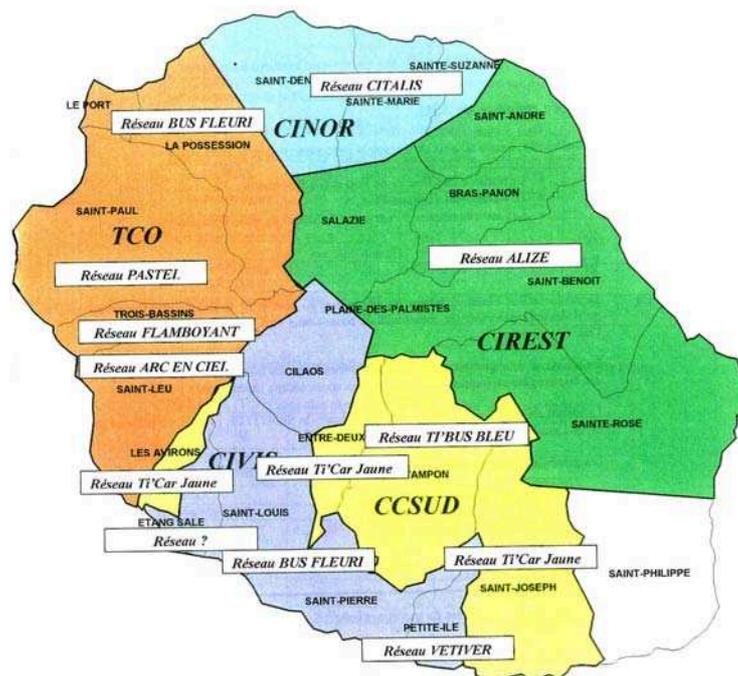
CINOR : Communauté Intercommunale du Nord de la Réunion

TCO : Communauté d'agglomération du Territoire de la Côte Ouest

CIREST : Communauté Intercommunale Réunion Est

CIVIS : Communauté Intercommunale des Villes Solidaires

CCSUD : Communauté de Communes du Sud

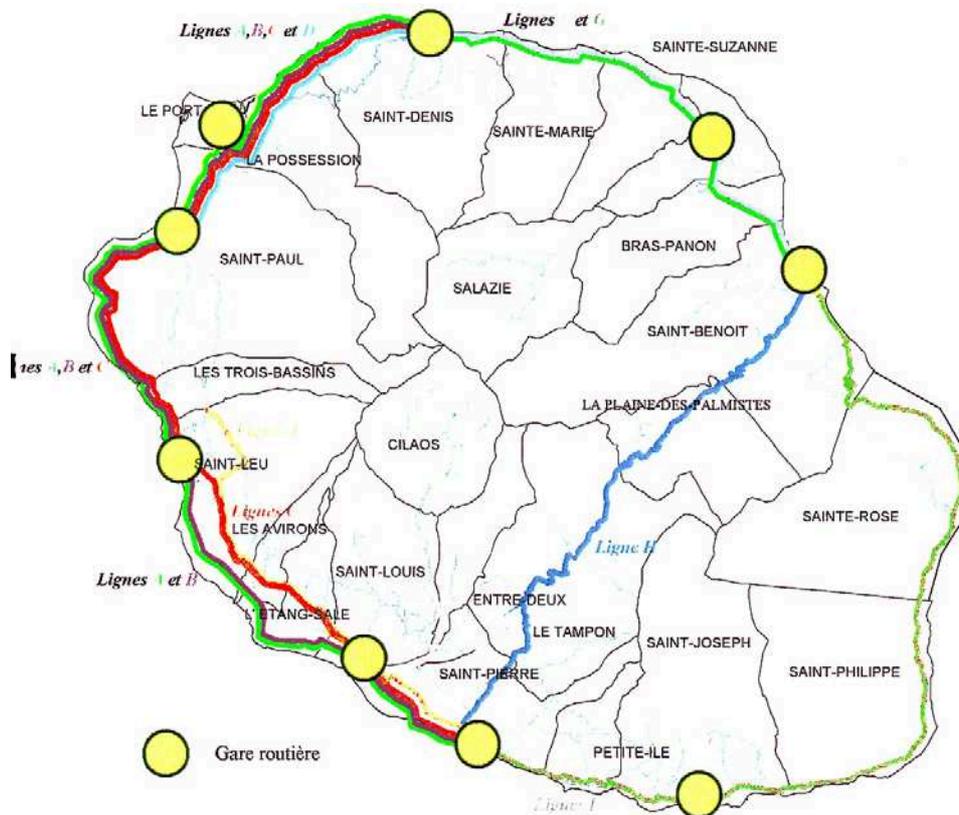


Groupement de communes et réseaux urbain

(Source : Région Réunion)

Sur la carte précédente, les réseaux urbains sont mentionnés. Dans l'étude de notre projet, la Route des Tamarins est empruntée et la liaison considérée est départementale (Saint Paul à Saint Pierre). Néanmoins pour éviter les problèmes de rupture de charge, une réflexion sur les interconnexions entre réseaux urbains, interurbains et départemental.

A La Réunion, le seul réseau assurant le flux de passagers entre Saint Paul et Saint Pierre est le réseau *Car Jaune*.



Réseau Car Jaune

(Source : Région Réunion)

Les lignes **A**, **B** et **C** traversent l'île du nord au sud par l'ouest. La ligne **A** est l'**Express**, la **B** passe par les **Bas** de l'île (littoral) et la **C** par les **Hauts** (zone de mi-pente).

Les sociétés gérant les transports sont les SEM telles que *Semittel*, *Semto*, *Sotrader*, *Sodiparc*,... Elles possèdent des bus ou cars mais la plupart du temps elles louent à des Privés (Transporteurs) leurs bus/cars et leurs chauffeurs.

iii. Schéma des déplacements

Il est important de connaître les prévisions de déplacement sur l'île mais il est également très difficile de les estimer.

Les documents suivant ont été obtenus par la SR21 qui est mandatée par la Région sur le projet du Tram-Train. L'étude de faisabilité du pôle d'échange de Saint Paul permet une première ébauche des données et contraintes.

	Situation 2003 à la gare routière			Situation 2012/2015 au pôle d'échange		
	Trafic par JO	Mode actuel	Fréquence (heure de pointe)	Trafic (estimé JO)	Mode proposé	Fréquence (heure de pointe)
Ligne 1	550	Micro+mini		1 500	minibus	10
Ligne 2	550	Micro+mini		1 500	minibus	10
Ligne 3	450	Micro+mini		1 300	minibus	8
Ligne 4	150	Micro+mini		300	minibus	4
Ligne 5	300	minibus		1 000	minibus	10
Ligne 8	1 400	Micro+mini		3 200	autobus	8
Ligne 9	1 600	Micro+mini		3 600	autobus	10
Ligne 63bis	400	minibus	3	1 000	autobus	4
Lignes car jaune	2 000	autocar	4	4 000	autocar	8
TOTAL	7 400			17 400		

Récapitulatif trafics actuels et prévisionnels des lignes connectées au pôle d'échange de Saint Paul

(Source : SR21)

Fonctionnement des Lignes du réseau PASTEL et CARS JAUNES sur le Pôle d'Echanges de St Paul

Horizon 2015 (avec mise en place du TramTrain)

(données : SYSTRA)

Trafic d'échange BUS / TRAMTRAIN à l'heure de pointe du matin dans le sens de la charge

Ligne	Terminus (1)	Proximité	Fréquence	Intervalles min	BUS		Mini-BUS		Total véhicules en attente		longueur du qual en m	Remplissage des BUS (hypothèse à confirmer)	Nb Voyageurs HP	
					Capacité	longueur	Capacité	longueur	distance entre BUS (2)	en attente				
PASTEL (et Trois-Bassins)														
1	OUI	RD 6	10	6			10	21	9	10	9	50%	105	
2	OUI	RD 6	10	6			10	21	9	10	9	50%	105	
3	OUI	RD 5	8	8			8	21	9	8	9	50%	84	
4	OUI	RD 5	4	15			4	21	9	4	9	50%	42	
5		C. VILLE	10	6			10	21	9	10	9	50%	105	
8	OUI	RN1 Nord	8	8	8	57	12			8	12	50%	228	
9	OUI	RD 6	10	6	10	57	12			10	12	50%	285	
63bis	OUI		4	15	4	57	12			4	12	50%	114	
Nouv.			4	15			4	21	9	4	12	50%	42	
					sous-total :		22			68			255	1 110
CARS JAUNES														
A		Rat-CHRay	1	60	1	57	12			1	12	50%	29	
B	OUI	Rat-CHRay	3	20	3	57	12			3	12	50%	86	
C1		Rat-CHRay	2	30	2	57	12			2	12	50%	57	
C2	OUI	Rat-CHRay	2	30	2	57	12			2	12	50%	57	
13 lignes au total					sous-total :		8			8			120	228
					total :		30	46		76	375	m	1 300	1 110

Nb moyen de voyageurs sur un intervalle de 5 mn :

Surface de stationnement + voie en m2 : 3 000

soit en m2 par ligne : 231

soit en m2 par poste à qual : 130

Nota : (1) : Les Lignes en terminus ont 2 postes à qual

(2) : La distance prévue entre 2 véhicules doit permettre la manœuvre d'arrivée et de départ au BUS sans recul

Fonctionnement des lignes du réseau Pastel et Car Jaune sur le pôle d'échanges de St Paul

(Source : SYSTRA)



Les prévisions sont un doublement du trafic journalier des lignes du réseau Car Jaune A, B et C.

La commune de Saint Paul a confié, en 1993, la gestion des transports à une SEML, la SEMTO qui gère le réseau Pastel.

La Sotrader dépend du Département et gère le réseau Car Jaune.

iv. Notion de rupture de charge

Lorsqu'un trajet en transports en commun s'effectue entre deux points avec un changement, alors on dit qu'il y a rupture de charge.

Au point de transition, il faut descendre et changer de véhicule. Ce passage demande un certain temps et une certaine distance à ne pas dépasser au risque de rebuter les usagers à l'emprunter. Il faut donc minimiser les distances à parcourir et synchroniser les arrivées et départs des véhicules.

Simple en théorie, ces deux contraintes sont primordiales dans chaque projet mais difficilement applicables.

En annexe E: Eléments intéressants sur les « Recommandations pour améliorer les performances d'une ligne de bus » diffusés par STIF, **pages 61 et 62**.

2) Hypothèses

La ligne choisie pour représenter la première flotte de cars à hydrogène empruntant la Route des Tamarins et reliant le Tram-Train à Saint Pierre est la ligne A du réseau Car Jaune. En effet, cette ligne rapide représente l'axe majeur de liaison entre Saint Denis et Saint Pierre à vocation « Express ».

On considère un doublement du trafic sur le réseau Car Jaune et en particulier sur la ligne A. Son trafic passera donc de 10 trajets AR par jour à 20 (effectué par 6 autocars).

Cette ligne représente une centaine de kilomètres aller-retour donc une cinquantaine de kilomètres pour un aller simple.

Il n'existe pas encore de car à hydrogène mais nous considérerons les caractéristiques du bus *Citaro* pour notre étude de cas.

3) Estimation

20 trajets de 100km chacun représente 20x100=2000km à parcourir par jour.

Un bus *Citaro* a une autonomie de 200-250km donc 10 remplissages des réservoirs sont suffisant.

Un bus plein contient au total 25kg de H₂ à 350 bars donc pour permettre à la flotte d'effectuer une journée complète, il faut produire 25x10=250kg de H₂ à 350bars.

Si on veut aucun rejet de particules (CO₂, CO, Nox,...) dans l'atmosphère, il faut produire l'H₂ par électrolyse de l'eau à partir d'électricité « verte » (panneaux photovoltaïques, éoliennes, biomasse, énergie des vagues, géothermie).

→A titre d'exemple, un pré-dimensionnement PV pour une consommation quotidienne de 250kg d'H₂:

On utilise un électrolyseur (HPE 65) de chez *Norsk Hydro Electrolysers* dont voici les caractéristiques techniques :

High Pressure Electrolyser (HPE)	
HPE Model No.	65
H ₂ Production (Nm ³ H ₂ /hr)	65
H ₂ Outlet Pressure	12 Bar
Hydrogen Purity (%)	99,9
Oxygen Purity (%)	99,5 ± 0,3
Power Consumption kWh/Nm ³	4,8 ± 0,1
DC Power Supply.-	
Amps.-	1500
Volts.-	216

En prenant comme hypothèse une consommation électrique de 5kWh/Nm³, la quantité électrique journalière à fournir pour une telle consommation d'hydrogène serait de 14 MWh.

Nous considérons notre installation dans la zone la plus ensoleillée de l'île, c'est à dire en zone1 (4.96 kWh /m²/jour). Notre dimensionnement PV se calcule en fonction des besoins à satisfaire et du gisement solaire sur le lieu considéré suivant la formule :

$$P_c = E_j / (0.6 * E_i)$$

P_c = puissance crête en Wc

E_j = énergie électrique à compenser par jour (Wh/jour)

E_i = énergie solaire incidente (kWh/m²/jour)

Nous trouvons donc une puissance de 5MWc (41000m² de panneaux solaires) à mettre en place pour couvrir de tels besoins.



Ce calcul très simple, ne prend pas en compte plusieurs éléments importants dont la compression du gaz à 350 bars. L'utilisation combinée de différentes sources d'énergies renouvelables peut fournir l'énergie nécessaire en améliorant nettement le retour sur investissement. Ce travail est effectué par le Groupe Hydrogène afin de mieux dimensionner la flotte avec une courbe de charge précise.

En annexe G : La ressource solaire à La Réunion, **pages 64-67**

4) Conséquences

Un autobus consomme environ 50l/100km donc la ligne A représente une économie de 1000 litres de gasoil par jour soit plus de 300 000l de gasoil en un an.

Ce qui équivaut à **1 300 tonnes de CO₂** par an *non émis dans l'atmosphère*. Les émissions de CO, HC, Nox et particules évitées par an par la mise en place du réseau :

Nox	:	3,2 tonnes
CO	:	1,3 tonnes
HC	:	430kg
Particules	:	650kg

(Selon les normes **EURO 3, 2001**)

En annexe F : Particularité de chaque rejet, **page 63**

La conférence de Kyoto et l'engagement des pays développés à réduire les émissions de gaz à effet de serre durant la période 2000-2012 impose certaines restrictions. L'Europe doit diminuer de 8% ses émissions. Les transports en tout genre sont responsable de 60% des importations de pétrole sur le territoire français, il est donc important de réagir et d'obtenir son autonomie.

Si la production d'hydrogène se fait sur l'île par un couplage avec des énergies renouvelables alors l'indépendance énergétique de la Réunion sera possible et le PRERURE sera respecté. De plus, l'économie de la filière hydrogène aura son cycle de vie sur l'île. Tout est créé à la Réunion donc les fonds, emplois, activités,... seront réunionnais. Un avantage économique certain pour l'île et ses habitants.

A l'horizon du Tram-Train, le flux de passagers empruntant le réseau de cars permettra d'éviter par an la circulation de 350 000 véhicules sur les routes.

Etre les précurseurs d'une nouvelle technologie est un avantage culturel et économique. Un transport en commun ne rejetant aucune particule nocive pour l'organisme et respectueuse de l'environnement est un atout majeur pour l'avenir. Ce genre de réseau sera universel dans un futur proche mais il nécessite un investissement initial pour sa première mise en œuvre.



Annexe D : Notion de peak oil et prévisions rejet de CO2 avec une économie en partie sur l'hydrogène, **page 59 et 60**.

X. CONCLUSION

Les technologies sont connues et continuent de se perfectionner au fil des années. Un réseau de cars fonctionnant avec des PAC sur l'île fera inévitablement son apparition sur l'île de La Réunion. Celle-ci peut se concrétiser à l'horizon du Tram-Train si des partenaires contribuent à la création d'un Groupe Hydrogène au sein de l'ARER en finançant sa pérennisation.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau provenant d'électricité renouvelable a un cycle de vie sans aucune émission de particules nocives. Cet hydrogène provient d'une richesse gratuite et son exploitation enrichit la Réunion par le nombre d'emplois que la filière crée. Les difficultés de production, stockage et distribution imposent la création de vraie centrale. Il n'est pas intéressant de produire de l'hydrogène en petite quantité à certains endroits et de l'acheminer ensuite pour le stocker ou le distribuer. C'est donc une ferme d'énergies renouvelables qui devra naître sur l'île pour une production suffisante d'H₂.

La rencontre d'acteurs nous a permis de discerner une solution à plus court terme pour l'utilisation de la filière hydrogène. Le transport scolaire sur l'île peut aussi se faire par des bus PAC. Les usagers seraient alors les passagers de demain. Un atout supplémentaire pour se faire connaître et percer dans l'avenir. La demande est journalière et des zones scolaires se forment tout autour de l'île.

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 tuteur de mon stage, qui m'a fait confiance et m'a considéré comme un membre de l'équipe en me confiant certaines responsabilités.

Messieurs Picou, Araboux, Legros, Maillot 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, Marie Touvet et Sabine Robert, responsables de la gestion administrative, évènementiel 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 et tout particulièrement mon binôme-collègue Damien Amichaud.

J'adresse mes remerciements à tous les partenaires et personnes qui m'ont aidé à rassembler les informations nécessaires: M.Mooland du groupe Transports Mooland, M Morlet de la Direction des Opérations de la Route des Tamarins, Mr Fung de la SR21, M.Claude Gindrey du CHD de Saint Denis, M.Benard du Parc National des Hauts, M

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



WEBOGRAPHIE

www.eihp.org

www.brennstoffzellenbus.de

www.fuelcells.org

www.daimlerchrysler.com

www.psa.fr

www.fuelcelltoday.com/index/

www.annso.freesurf.fr

www.cea.fr

www.fuel-cell-bus-club.com/

www.afh2.org

www.reunion.equipement.gouv.fr/

www.agorah.com/

<http://veille.reseupaco.org/>

www.ademe.fr/

BIBLIOGRAPHIE

Rapport d'Activité DDE 2003

Observatoire des Transports et des Déplacements, AGORAH, Mars 2003

Observatoire des Transports et des Déplacements, AGORAH, Synthèse 2002

Etude de faisabilité pour l'extension du Tram-Train Régional entre Saint Paul ville et l'Hermitage, SR21, Février 2004.

Schéma Régional des Déplacements, Conseil Général de la Réunion, Juin 2003

DVD Hydrogen HAWAII, 2003 Edition

Fuel Cell Technology Handbook, Edited by Gregor Hoogers, 2003

ANNEXES

A

Bus Mfr.	Operation	Model	Year Shown	Engine Type	Fuel Cell Size/Type	Fuel Cell Mfr.	Range (mi/km)	Max. Speed	Fuel Type	Picture
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1994	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ Phosphoric Acid FC (PAFC)	Fuji Electric	250mi 402km	55mph 90km/h	Methanol	
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1995	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ PAFC	Fuji Electric	250mi 402km	55mph 90km/h	Methanol	
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	Generation I of Georgetown University's program	30-foot Transit Bus	1995	Fuel cell/ battery hybrid	50kW/ PAFC	Fuji Electric	250mi 402km	55mph 90km/h	Methanol	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Generation II of Georgetown University's program This bus will start a 1 yr. demonstration with Washington DC's Metro Area Transit Authority later in 2003	40-foot heavy duty transit buses	1998	Fuel cell/ battery hybrid	100kW/ PAFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	350mi 563km	66mph 106km/h	Methanol	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Generation II of Georgetown University's program This bus is used for national demonstration purposes	40-foot heavy duty transit buses	2000	Fuel cell/ battery hybrid	100kW/ PEMFC	Ballard	350mi 563km	66mph 106km/h	Methanol	
Undetermined	Generation III of Georgetown University's program	40-foot low-floor bus platform	2003	Fuel cell/ ultra capacitors hybrid	At least 240 kW/ PEMFC	Undeter.	N/a	N/a	Methanol	
New Flyer Industries Ltd.	Proof of Concept	P1: low fl. transit bus based on New-Flyer model 40	1993 world's first	Fuel cell/ battery hybrid	90kW/ PEMFC	Ballard	250mi 400km	60mph 95km/h	Compress. Hydrogen	
N/a	Proof of Concept	P2: full-sized, 40-foot	1995	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	250mi 400km	N/a	Compress. Hydrogen	
Evobus: a Daimler Chrysler company	Accumulated over 540 hrs driving exper. By 1997, two week road test in Oslo, Germany 1999	Nebus: 405 low-fl. urban regular-service bus	1997	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	155mi 250km	50mph 80km/h	Compress. Hydrogen	
Evobus: a Daimler Chrysler company	Demonstrated at SunLine Transit, AC Transit, and CaFCP	Zebus (P4): 40 ft. (1 year demo with SunLine)	1999	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	
Evobus: a Daimler Chrysler company	Sold as part of the CUTE; ECTOS; Perth, Australia programs. Cost ~US\$3 million unsubsidized each. Madrid's 1 st Citaro has been delivered.	Citaro (P5): (33 for the CUTE, ECTOS, STEP)	2003	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	124mi 200km	50mph 80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
Gillig Corporation	VTA, San Metro Transportation District, CaFCP & CARB - 3 FC Buses will be operated at VTA in San Jose, Ca	N/a	2004	Fuel cell/ battery hybrid	205 kW/ PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Hydrogen	
Irisbus: a Renault V.I. and Iveco Co.	Will be demonstrated in Torino, Italy in 2002	40 foot	2001	Fuel cell/ battery hybrid	60kW/ PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	
MAN "Bavaria 1"	Regular service in Erlangen and Nuremberg, Germany. 50% funded by Bavarian State	40 ft. low-floor city bus NL 263 "Bavaria I"	2000	Fuel cell/ battery hybrid	120kW/ PEMFC	Siemens	155mi 250km	50mph 80km/h	1548 L Compress. Hydrogen	

(Source : www.fuelcells.org)

A

MAN	Will be used for EU's THERMIE program: Berlin, Copenhagen, Lisbon	40 ft. MAN N L223 low floor	Not Compl	Fuel cell/ Super capacitor hybrid	5 x 30kW/ PEMFC	Nuvera	N/a	N/a	700 L Liquid Hydrogen @ -253° C	
MAN	Will deliver one fuel cell bus to be operated as part of the hydrogen project at Munich Airport from early 2004 onwards.	40 ft. MAN low floor	Not Compl	Fuel cell/ battery hybrid	PEMFC	Ballard	N/a	N/a	H2 tanks on the roof at 5,000 psi	N/a
Neoplan	2 years fee-paying service in public traffic in the German spa resort Oberstdorf. Funded by Bavarian State	Midi bus N 8008 FC	1999	Fuel cell/ battery hybrid	40kW/ PEMFC	Nuvera	373mi 600km	30mph 50km/h	Compress. Hydrogen	
Neoplan	Available for Sales	N8012 - 33-seat bus	2000	Fuel cell/ 100kW flywheel hybrid	80kW/ PEMFC	Proton Motor Fuel Cell GmbH	155mi 250km	50mph 80km/h	Compress. Hydrogen	
New Flyer Industries	Demo. service of 3 buses in Chicago (1997) and Vancouver (1998) for 2 years	P3: H40LF models	1998	Fuel cell/ battery hybrid	205kW/ PEMFC	Ballard	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	
New Flyer Industries	Natural Resources Canada (US\$1.9 million) and Hydrogenics for demo in Winnipeg, Manitoba, Canada *Will incorp. Vehicle-To-Grid technology	40 ft.	March 2005	Distributed array of 25kW modules w/ ultra-capacitors	180kW/ PEMFC	Hydrogenics	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	N/a
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Demonstrated in NY, NV, and DC. Received FTA funding to continue program.	Standard 40-foot transit bus	1999	Zinc-Air fuel cells with batteries	Zinc-Air	Arotech	N/a	65mph 105km/h	Zinc	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	Plans for RTC (Nevada Transit Agency) to use 2 - 5 buses	Standard 40-foot transit bus	2001	Zinc-Air fuel cells with ultra-capacitors	Zinc-Air	Arotech	N/a	N/a	Zinc	
Thor Industries (ThunderPower LLC)	Will be tested by SunLine Transit in 2002 for 6 months (started public service at Sunline Nov. 6, 2002)	30 ft. Low Floor El Dorado National E-Z Rider	2001	Fuel cell/ battery hybrid	75kW/ PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	200mi 322km	55mph 90km/h	Compress. Hydrogen	
Van Hool	3 will be used in regular service at AC Transit	40 foot	Not Compl	Fuel cell/ battery hybrid	PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	250mi 400km	65mph 105km/h	5,000 psi Compress. Hydrogen	
NABI	1 will be used in regular service at SunLine Transit	45 foot	Not Compl	Fuel cell/ battery hybrid	PEMFC Ambient-pressure	UTC Fuel Cells	N/a	N/a	Compress. Hydrogen	N/a
Van Hool	No Demonstration (Project EUREKA)	18 meter City Bus	1995	Fuel cell/ battery hybrid	78kW/ PAFC	Elenco	186mi 300km	N/a	700 Liters Liquid Hydrogen	
Macchi-Ansaldo (EC project EQHPP)	Company Testing only, part of the EC project EQHPP	Full size regular floor city bus	1997	Fuel cell/ battery hybrid	45kW/ PEMFC	Nuvera	250mi 400km	N/a	600 Liters Liquid Hydrogen	
Hino Motors Ltd. (Toyota subsidiary)	Toyota in-house testing	Low-floor city bus: FCHV-BUS1	2001	Fuel cell/ battery hybrid	160kW/ PEMFC	Toyota	186mi 300km	50mph 80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
Hino Motors Ltd. (Toyota subsidiary)	Tokyo metro. gov. will use this bus during summer 2003 on Tokyo's new waterfront route - Japan's nat'l debut of public fuel cell buses	60 pass. Low fl., diesel model. FCHV-BUS2	2002	Fuel cell/ battery hybrid	180kW/ PEMFC [2 x 90kW]	Toyota	186mi 300km	50mph 80km/h	Compress. Hydrogen @ 5,000 psi	
NovaBus Corporation (a subsidiary of Volvo)	BVG - Berlin's public transportation body - to buy 2 prototypes, which will start testing in 2003	15.3 meter long Double-Decker	Not Compl	N/a	N/a	Proton Motor Fuel Cell GmbH	N/a	N/a	Hydrogen	

(Source : www.fuelcells.org)

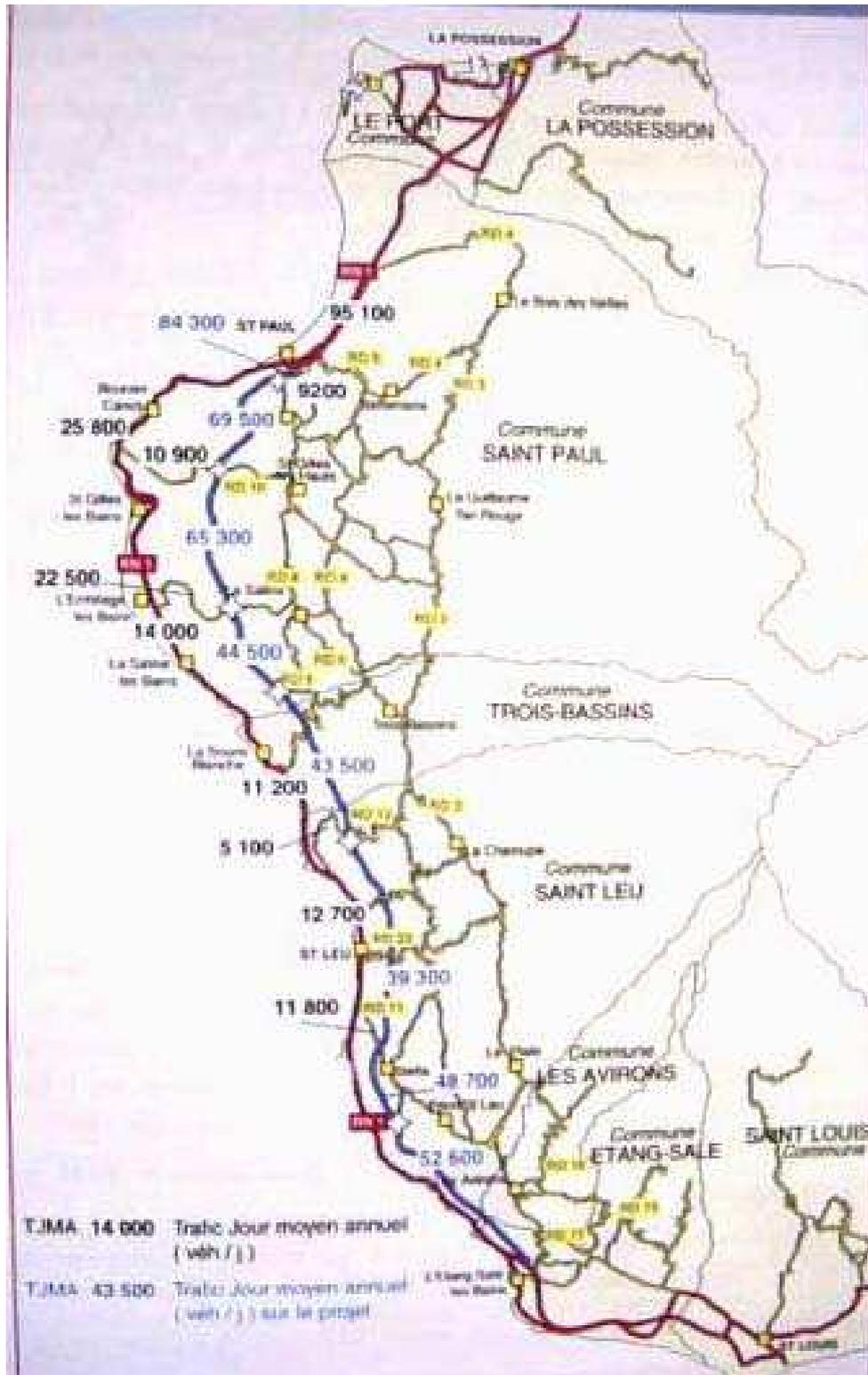
B



Prévision trafic côte ouest sans la Route des Tamarins

(Source : DDE)

B



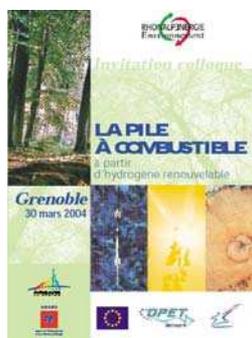
Prévision trafic côte ouest avec la Route des Tamarins

(Source : DDE)

C



RAPPORT DE MISSION



**La pile à combustible,
à partir d'hydrogène renouvelable**

Grenoble, le 30 mars 2004

Programme de la journée : Joint en annexe

NB : Un intervenant supplémentaire s'est ajouté à la liste : M.Serge REVEL du Conseil général de l'Isère.

- Documents :

Les seuls documents disponibles lors du colloque ont été joints au rapport :

- Présentations PowerPoint, sur support papier, des intervenants
- RHONALPENERGIE Environnement, « La Lettre », n°20 – mars 2004
- Liste de toutes les personnes présentes au colloque avec leurs coordonnées
- Plaquette de présentation de la société AXANE, filiale d'Air liquide, « Hydrogen and Fuel Cells »

- Déroulement de la journée :

Rencontre avec **M.LABIE**, Directeur de Rhônalpennergie-Environnement. Cette structure existe depuis 1978 et travaille avec des collectivités pour prôner une utilisation rationnelle de l'énergie. Elle organise des journées et des séminaires pour regrouper des industriels et professionnels. Ces actions favorisent le dynamisme intellectuel et économique de la région en matière d'énergies renouvelables. M.LABIE assure que leur ancienneté a permis de créer de nombreux partenariats et qu'il serait prêt à être en contact avec l'ARER afin de travailler ensemble.

09h45 - **M.VIDIL**, Directeur de l'école ENSIEG et **M.LABIE**

Prochaine création de 'La maison de l'énergie' sur le campus de l'école et la formation d'étudiants se fera par l'intermédiaire de ce projet.

10h00 - **M.REY**, LITEN du CEA de Grenoble

Explications générales sur les piles à combustible.

10h45 - **M.CLAUDET**, anciennement au CEA de Grenoble

Il travaille sur la production d'hydrogène et privilégie l'utilisation de biomasse (ressource lignocellulosique) comme source de production. Connaissant la Réunion, il sait que le rôle de la bagasse est un avantage économique.

11h30 - **M.BOUDET**, IFP

Projet de l'Institut sur la production d'H₂ par vaporéformage de l'éthanol.

11h50 - **M.MARCEL**, Transénergie

Cette entreprise s'occupe d'énergies renouvelables, maîtrise de l'énergie, électrification rurale décentralisée. Ses connaissances et ses références en font une



source intéressante d'informations. Transénergie teste en ce moment une PAC d'Axane dans une usine de Milan. M.MARCEL connaît déjà le Directeur de l'ARER.

REPAS

Rencontre de
l'hydrogène
de l'ARER.

M.ALLEAU, Président de l'association française de
Spécialiste en matière d'H₂, il est prêt à aider les stagiaires
M.GBEGNONVI, INERIS

14h00 – **M.ALLIDIERES**, Air Liquide

Fournisseur mondial de H₂. Le réseau actuel permet de distribuer suffisamment de combustible pour une flotte d'une vingtaine d'autobus et d'une cinquantaine de voitures.

14h40 – **M.PAULMIER**, Axane

Filiale d'une vingtaine de personnes d'Air liquide. Créée en 2001, elle a pour but de commercialiser une pile à combustible de 2kW, la Roller Pac™. Au stade de prototype, elle sera sur le marché en 2005 ou 2006. Démonstration du prototype.

15h25 – **M.PAULMIER** et **M.ZENATTI**, Vice-président de Grenoble-Alpes-Métropole

Présentation du projet européen HYCHAIN. La Métro fédère les énergies de ses communes membres pour animer, investir, construire, aménager et mener à bien de grands projets.

15h50 – **M.REVEL**, Vice-président du Conseil Général de l'Isère

Présentation du projet commun du CEA et du Conseil général de l'Isère pour le développement de la filière hydrogène.

16h10 – **M.BAUD**, Gaz et Electricité de Grenoble

Présentation de l'intérêt et des perspectives de GEG pour le développement des énergies renouvelables et en particulier pour les PAC.

16h20 – **M.BOURGEOIS**, LEPII-EPE-INERA

L'économie de l'hydrogène appliquée plus particulièrement aux PAC.

16h40 – **M.BRUNET**, Président d'INERA

Conclusion et remerciements à tous les intervenants et participants.



- Contacts récoltés

M.CLAUDET, retraité continuant ses travaux au CEA :
gclaudet@cea.fr

M.MARCEL, Responsable des projets Européens de Transénergie :
jcmarcel@transenergie.fr
04 72 86 04 14

M.PAULMIER, Directeur Marketing et Ventes d'Axane :
philippe.paulmier@airliquide.com
04.76.43.60.93

M.ZENATTI, Vice-président de Grenoble-Alpes-Métropole :
danielzenatti@wanadoo.fr
06.60.32.61.61

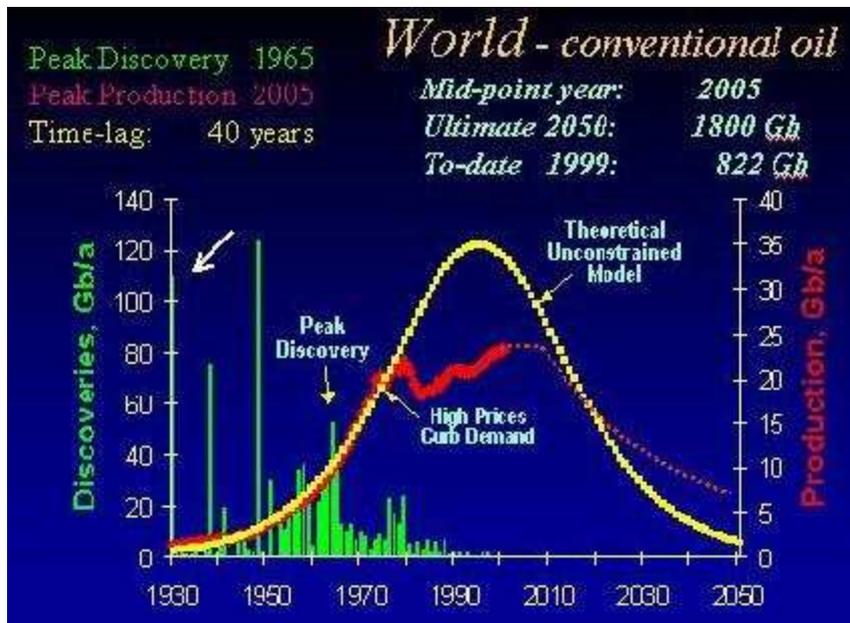
M.ALLEAU, Président l'Association Française de l'Hydrogène :
thierry.alleau@wanadoo.fr
04.76.94.26.90

Il est important de noter que ce colloque a permis de faire un bilan des connaissances et des travaux effectués par les acteurs locaux ou nationaux. Beaucoup de questions sont encore sans réponse mais ils travaillent tous dans le même sens et peuvent, pendant ces séminaires, se rencontrer et créer une nouvelle dynamique ainsi que des partenariats.

Pour l'ARER, **Anthony LEFEBURE**

D

Notion du peak oil



In green we see the discoveries of oil. Dr. Campbell asks us to note the few exceptional spikes from the Middle East. The red solid line is the amount of oil produced. The dotted red line is the amount expected to be produced. As you can see, the oil shortages (valley in green, or discoveries) of the early seventies caused a slow down in production, right on the graph where it says "High Prices Curb Demand". What this did was cause a leveling off in production, a good thing, as instead of the hypothetical, expected or "Theoretical Unrestrained Model", looking much like a bell curve, the red dotted plot lines show a slow rise and a smoother "peak". Same end result, a decline away to nothing. Fossil fuels are finite. The lesson Dr. Campbell brings us is "that if we produce less today, there is more left for tomorrow."

(Source: www.civilamerica.org)

Rejet CO2 avec hydrogène

La réduction de l'émission des gaz à effet de serre est aujourd'hui une nécessité afin de limiter les conséquences de l'activité humaine sur le changement climatique. Comme 75% de l'énergie consommée dans le monde provient des combustibles fossiles dont la combustion produit des grandes quantités de dioxyde de carbone (CO₂), il faut, dans l'avenir, limiter leur usage dans les systèmes de combustion, fixer le CO₂ et proposer des combustibles alternatifs non polluants. Dans ce contexte, l'hydrogène associé aux piles à combustibles (PACo) apparaît comme une solution viable à long terme. Par exemple, la Figure 1, issue d'une étude récente (Barreto L., Makihiro A., Riahi K. " The

hydrogen economy in the 21th century: a sustainable development scenario " Int. J. Hydrogen Energy 28 (2003) 267-284.) montre qu'un taux de remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène de 25% permettrait de stabiliser les émissions de CO₂ et qu'un taux de 50% permettrait réduire les émissions à un niveau inférieur à celles de 1990. L'échelle de temps proposée est d'environ 100 ans et l'étude tient compte de l'accroissement de la consommation durant la même période.

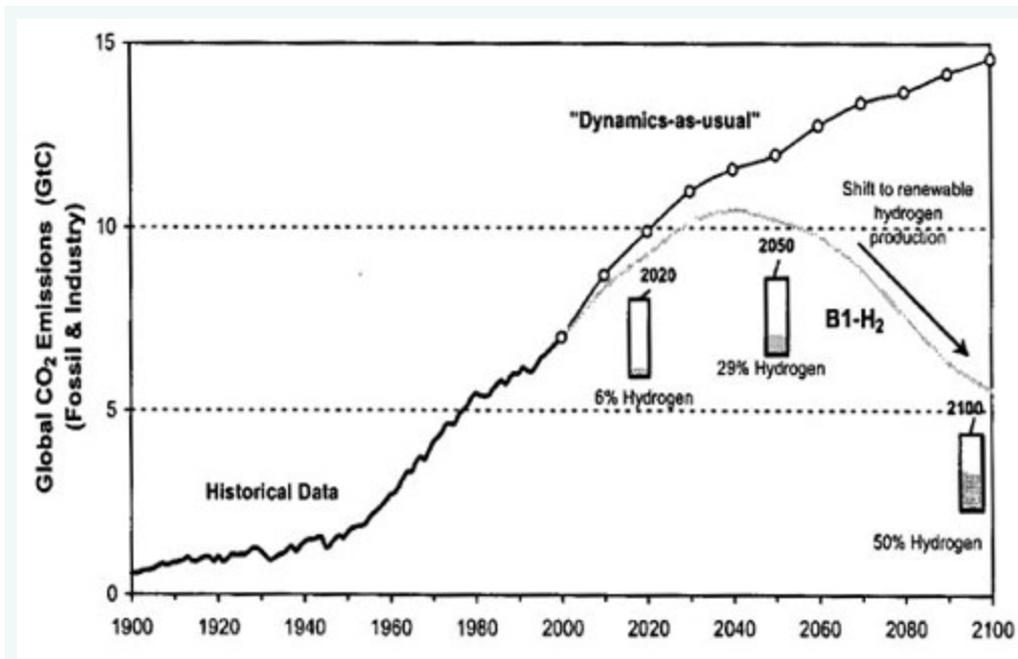


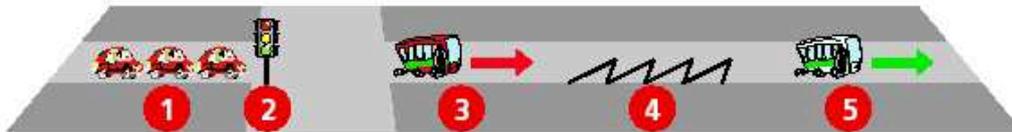
Figure 1. Stratégie de réduction de l'émission de CO₂ par substitution des combustibles fossiles par l'hydrogène, d'après Barreto et al. (2003).

Les énergies renouvelables et, en particulier, l'énergie solaire peut contribuer à l'émergence de solutions alternatives basées sur l'hydrogène. En effet, ce nouveau combustible permet en plus de résoudre un problème crucial des énergies renouvelables : le stockage et le transport.

(Source : www.imp.cnrs.fr/hte3_fr/equip2_3_1.php)

E

Temps de parcours - définition



temps de parcours total = 1 + 2 + 3 + 4 + 5

temps "inutile"	1	<p>Durée depuis l'arrivée dans la file d'attente (vitesse très faible, inférieure à 5 km/h) en amont du carrefour à feux jusqu'à l'immobilisation dans le cycle qui précède le franchissement.</p>  <p style="text-align: center;">→ Temps perdu 1 →</p>	<p>"COMPRESSIBLE"</p> <p>car dépendant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de l'affectation des voies, • du fonctionnement global de la régulation (stratégie), • de la géométrie du carrefour (difficulté d'écoulement des mouvements tournants), • des charges de trafic.
	2	<p>Durée depuis l'immobilisation dans le cycle qui précède le franchissement jusqu'au franchissement.</p>  <p style="text-align: center;">→ Temps perdu 2 →</p>	<p>"COMPRESSIBLE"</p> <p>car dépendant du principe de fonctionnement du carrefour (détection, microrégulation effective) et de la géométrie du carrefour (difficulté d'écoulement des mouvements tournants)</p>
temps "utile"	3	<p>Durée d'immobilisation du véhicule liée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • à l'accès à l'arrêt, • à l'insertion dans la circulation (en sortie d'arrêt notamment), • à la présence de stationnement illicite sur la file de circulation du bus, • aux traversées piétonnes devant le bus, • à la largeur réduite des voies de circulation, • etc <p> A une vitesse très faible, inférieure à 5 km/h, le véhicule est considéré comme immobilisé.</p>	<p>"COMPRESSIBLE"</p> <p>car dépendant de l'aménagement de la voirie</p>
	4	<p>Durée depuis l'immobilisation du véhicule à l'arrêt jusqu'à la fermeture des portes.</p> <p> Si le chauffeur maintient les portes ouvertes car il est immobilisé pour d'autres causes que celle du chargement de passagers (feux rouges, etc.), ce temps ne doit pas être considéré comme du temps d'arrêt en station, mais comme du temps perdu.</p>	<p>PARTIELLEMENT "COMPRESSIBLE"</p> <p>car dépendant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • du mode de gestion des accès et sorties du véhicule, • du mode de vente de titres de transport, • du mode d'enregistrement des abonnements, • etc.
	5	<p>Temps déduit en retranchant du temps de parcours total la somme des temps d'arrêt et des temps perdus.</p>	<p>QUASIMENT "INCOMPRESSIBLE"</p> <p>car dépendant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la puissance des véhicules, • des vitesses de pointe autorisées et admissibles pour le confort des usagers, • du tracé, • etc.

Extrait des « Recommandations pour améliorer les performances d'une ligne de bus » diffusé par STIF

E

Causes principales des pertes de temps

La démarche d'identification des causes des temps compressibles est la suivante :



	Données nécessaires à l'analyse	Causes possibles
Temps perdu dans les files d'attente	<ul style="list-style-type: none"> plan du carrefour (<i>calibrage</i>) plan de feux (<i>si carrefour à feux</i>) charges de trafic (en section (journalier) et directionnelles (<i>heures de pointe</i>)) longueurs des files d'attente (<i>relevé in situ</i>) ... 	<ul style="list-style-type: none"> absence de couloir bus d'approche couloir bus d'approche trop court et pas accessible au bus qui arrive en fin de file d'attente mauvaise affectation des voies (<i>feux ou giratoire</i>) mode de gestion du carrefour inadapté (<i>feux ou giratoire</i>) stratégie de régulation incorrecte ...
Temps perdu aux feux	<ul style="list-style-type: none"> plan de feux ... 	<ul style="list-style-type: none"> absence de détection du bus système de détection spécifique du bus en panne programmation des feux non optimale ...
stat. illicite / livraisons	<ul style="list-style-type: none"> relevé des zones de stationnement illicite et de livraison sur le tracé analyse offre/demande en stationnement ... 	<ul style="list-style-type: none"> déficit d'offre en stationnement faible de la part des autorités compétentes ...
accès arrêt	<ul style="list-style-type: none"> plan de l'arrêt nombre de lignes bus fréquentant chaque arrêt 	<ul style="list-style-type: none"> longueur d'arrêt inadaptée à l'offre bus arrêt placé trop près du carrefour et inaccessible au bus pris dans la file d'attente géométrie de l'arrêt très contrainte (si arrêt en retrait) ...
Temps perdu en section courante	<ul style="list-style-type: none"> charges de trafic + calibrage sur le carrefour en aval de l'arrêt observations in situ ... 	<ul style="list-style-type: none"> charges de trafic importantes rendant l'insertion dans la circulation difficile ...
sortie arrêt (si arrêt en retrait)	<ul style="list-style-type: none"> plan de l'arrêt charges de trafic au droit de l'arrêt observations in situ ... 	<ul style="list-style-type: none"> voies trop étroites ...
divers	<ul style="list-style-type: none"> largeur des voies ... 	<ul style="list-style-type: none"> voies trop étroites ...
Temps d'arrêt en station	<ul style="list-style-type: none"> nombre de montées/descentes passagers mode de vente des titres de transport mode d'enregistrement des titres de transport plan de l'arrêt fonctionnement des accès/sorties passagers ... 	<ul style="list-style-type: none"> aire d'attente des passagers saturée lenteur du mode d'enregistrement des titres de transport (rapidité et quantité de matière) vente des titres par le chauffeur accès/sorties des passagers par les mêmes portes du bus ...

Extrait des « Recommandations pour améliorer les performances d'une ligne de bus » diffusé par STIF

F

Particularité de quelques polluants émis par la combustion du gasoil :

CO : Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) provient de la combustion incomplète des combustibles et carburants. Les teneurs en CO sont en général limitées, sauf en cas d'embouteillages, de circulation par temps froid et dans les tunnels. Il se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine, entraînant un manque d'oxygénation du système nerveux, du coeur, des vaisseaux sanguins.

CO2 : Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (gaz carbonique) (CO₂) n'a pas d'effet observé sur la santé mais est responsable à hauteur de 50 % de l'effet de serre.

Nox : Oxydes d'azote

Toutes les combustions émettent plus ou moins d'oxydes d'azote (Nox) mais en France, ceux-ci proviennent essentiellement de la circulation automobile, le NO émis par les pots d'échappement se transformant assez rapidement en NO₂. Ce dernier participe à la formation d'ozone en basse altitude et à celle des pluies acides. Ce gaz irritant peut altérer la fonction respiratoire.

Les particules en suspension

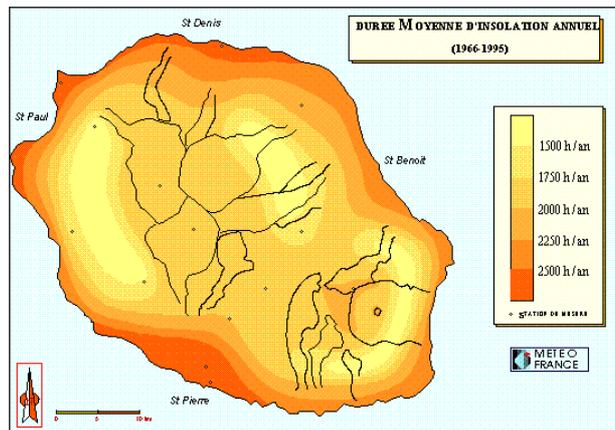
Ces minuscules particules proviennent des fumées des moteurs diesel, les plus fines pouvant transporter des composés toxiques (sulfates, métaux lourds, hydrocarbures...) dans les voies respiratoires inférieures. Les poussières peuvent aussi provenir de processus industriels ou d'installations de combustion.

G

La ressource solaire

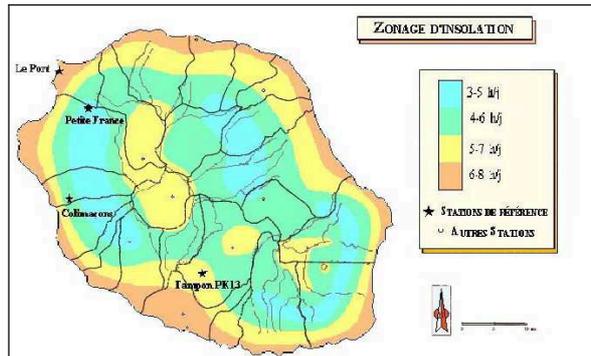
On parle d'insolation, dès que le rayonnement solaire est suffisant pour créer une ombre portée bien nette. Ce phénomène est observé à l'aide d'un héliographe, appareil conçu pour mesurer la durée de cette insolation.

La durée maximale théorique d'insolation par ciel clair est le temps compris entre les heures de lever et de coucher du soleil. Pour un lieu donné cette durée maximale théorique évolue naturellement au cours de l'année, avec le cycle des saisons. Pour un jour donné, le rapport entre la durée d'insolation observée et la durée maximale théorique ainsi définie, est appelé fraction d'insolation. Ce nombre dépend de la seule couverture nuageuse de la journée.



Durée moyenne d'insolation annuel

Par méthode statistique, quatre zones peuvent être définies. La zone la plus ensoleillée est constituée par le pourtour littoral, qui enregistre sur l'Ouest, et le Sud, ses meilleurs chiffres d'insolation. On trouve ensuite, la zone constituée par les régions situées juste en arrière du littoral, les cirques de Cilaos et Mafate et les sommets de l'île. Sur les deux autres zones qui recouvrent la majeure partie des « hauts », l'insolation est nettement plus faible, en particulier sur les grandes pentes du relief. A Petite-France par exemple (1450 h/an d'insolation en moyenne) la fraction d'insolation dépasse rarement 40 %. Ce déficit en ensoleillement est essentiellement lié aux formations nuageuses qui se développent habituellement en journée sur ces régions.



Zonage d'insolation (et contours des communes de la Réunion)

(Source : Météo France)

Ces zones, numérotées de la plus à la moins favorable en terme d'insolation, sont:

Zone 1 : de 6 à 8 heures d'insolation par jour

Station de référence : Le Port

Autres stations caractéristiques : Gillot

Terre Sainte (Saint Pierre),
Lignes Paradis (Saint Pierre)

Zone 2 : de 5 à 7 heures d'insolation par jour

Station de référence : Tampon PK 13

Autres stations caractéristiques : Menciol (Sainte Suzanne),

La Nouvelle,
Cilaos,
Plaine des Cafres,
Gîte Bellecombe.

Zone 3 : de 4 à 6 heures d'insolation par jour

Station de référence : Colimaçons (Saint Leu)

Autre station caractéristique : Plaine des Palmiste

Zone 4 : de 3 à 5 heures d'insolation par jour

Station de référence : Petite France (Saint Paul)

Autre station caractéristique : Plaine des Makes (Saint Louis)

Le rayonnement global à la Réunion, compte tenu de son relief, s'avère très variable selon l'altitude, même si, globalement, les taux de rayonnement les plus élevés sont relevés sur le littoral de la Réunion et les plus faibles sur les « Hauts » de l'île.

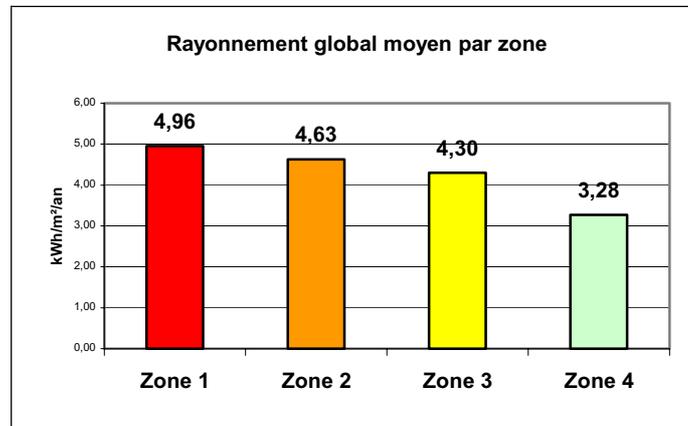
L'analyse des données pour l'ensemble des zones permet d'obtenir les « années-types » en terme de rayonnement global pour chacune de ces quatre zones :

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Zone1	5,58	5,54	5,21	4,62	3,92	3,61	3,73	4,26	5,11	5,63	6,15	6,14	4,96
Zone2	4,75	4,67	4,61	4,46	3,92	3,82	3,80	4,28	4,96	5,44	5,52	5,27	4,63
Zone3	4,51	4,58	4,55	4,26	3,34	3,25	3,28	3,82	4,73	4,84	5,30	5,17	4,30

Zone4	3,76	3,48	3,34	3,21	2,90	2,52	2,69	3,18	3,57	3,54	3,54	3,58	3,28
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tableau du rayonnement global en kWh/m²/jour

Ceci donne graphiquement les moyennes suivantes :



Evolution saisonnière :

A l'exception du littoral (Le Port), malgré des journées plus courtes, la durée d'insolation quotidienne moyenne est légèrement plus élevée pour les mois, allant de mai à août, que pour tous les autres mois de l'année. Cette différence est en moyenne d'une heure au profit des journées d'hiver. Cela tient à un ennuagement généralement beaucoup plus important durant les mois d'été, ce que mettent nettement en évidence les différentes courbes de fractions d'insolation.

Evolution quotidienne :

L'île de La Réunion, nous avons déjà eu l'occasion de le souligner, est caractérisée par un relief très important et très abrupt. De ce fait il ne faut pas négliger la position géographique du lieu de mesure. Un site sur un sommet aura plus d'ensoleillement qu'un site au fond d'une vallée encaissée, à cause de l'ombre provoquée par les remparts.

St Pierre (max. La Réunion)	2923 h/an
Gillot	2662 h/an
Petite-France (min. La Réunion)	1391 h/an
Toulon (max. métropole)	2917 h/an
Paris	1798 h/an
Abbeville (min. métropole)	1638 h/an

L'estimation de la production d'hydrogène a été obtenue en utilisant les rendements des différents composants du système d'électrolyse et la consommation électrique maximale (4.8 kWh/m³ d'hydrogène produit) ainsi que les moyennes mensuelles de l'irradiation globale journalière.

Résultats :

Site	Insolation (kWh/m2/jour)	Production H ₂ (l/m2/jour)
Zone1	4,96	93
Zone2	4,63	86,8125
Zone3	4,3	80,625
Zone4	3,28	61,5

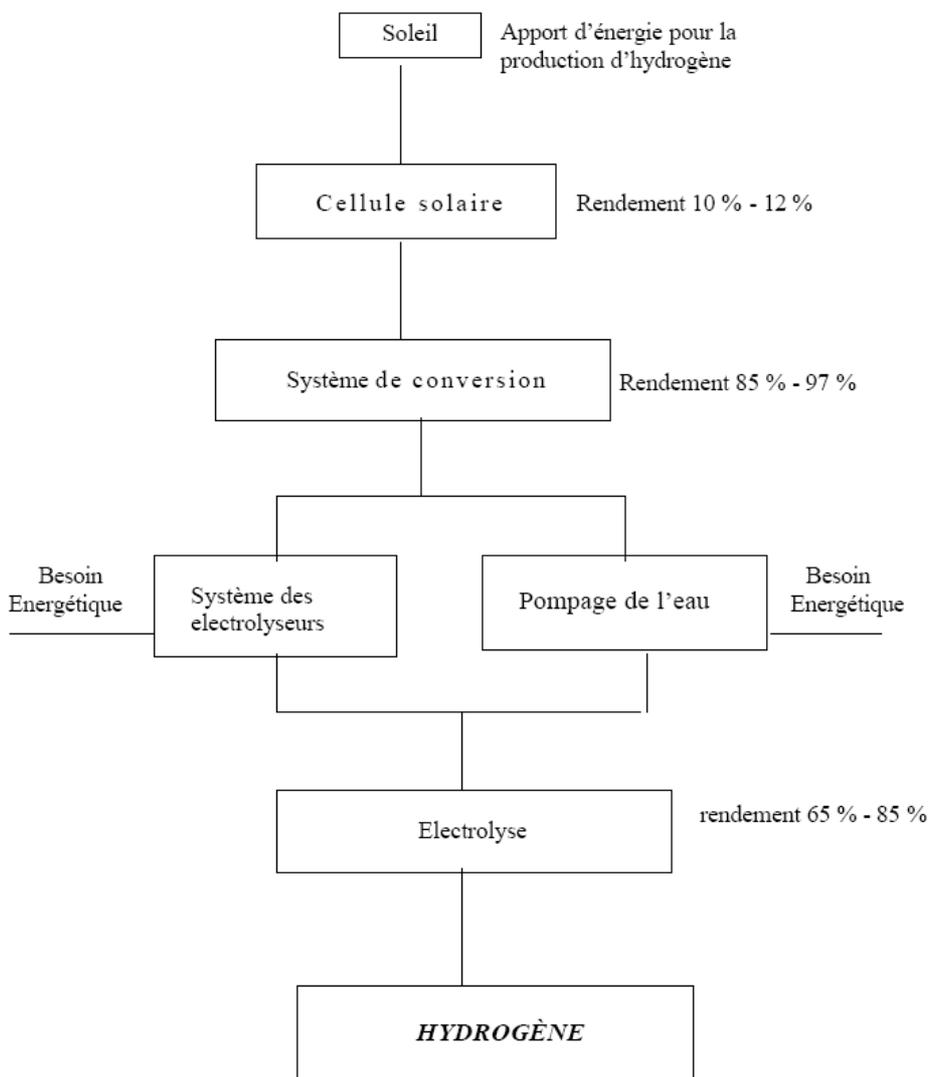


Fig. 4: Représentation schématique d'un système de production d'hydrogène