

# PROJET DE FIN D'ÉTUDES

24/05/2004 - 27/11/2004



AGENCE RÉGIONALE DE  
L'ÉNERGIE RÉUNION



ÉCOLE DES MINES DE DOUAI

---

Filière Hydrogène : Examen des conditions de mise en place d'un réseau de bus en flotte captive sur les quatre voies de l'île de la Réunion et analyse des inter modalités avec le Tram-Train.





# I. SOMMAIRE

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. SOMMAIRE .....                                                                                                                                          | 3  |
| II. REMERCIEMENTS .....                                                                                                                                    | 5  |
| III. EMPLOI DU TEMPS ET RESUME DES TACHES EFFECTUEES .....                                                                                                 | 6  |
| IV. RESUMES DU STAGE – FRANÇAIS, ANGLAIS .....                                                                                                             | 7  |
| V. INTRODUCTION .....                                                                                                                                      | 8  |
| VI. L'ARER : L'AGENCE REGIONALE DE L'ÉNERGIE REUNION.....                                                                                                  | 9  |
| A. ORGANISATION GENERALE.....                                                                                                                              | 9  |
| 1. <i>Objectifs</i> .....                                                                                                                                  | 9  |
| 2. <i>Missions</i> .....                                                                                                                                   | 10 |
| 3. <i>Les outils</i> .....                                                                                                                                 | 11 |
| 4. <i>Schéma de développement de l'ARER</i> .....                                                                                                          | 11 |
| 5. <i>Organigramme</i> .....                                                                                                                               | 13 |
| B. LA PFRD : PLATE FORME RECHERCHE & DEVELOPPEMENT .....                                                                                                   | 14 |
| VII. TRAVAUX REALISES .....                                                                                                                                | 15 |
| A. PREAMBULE .....                                                                                                                                         | 15 |
| 1. <i>Contexte énergétique</i> .....                                                                                                                       | 15 |
| a) Contexte énergétique mondial (Perspectives à long et moyen termes).....                                                                                 | 15 |
| b) Contexte Energétique à la Réunion .....                                                                                                                 | 16 |
| 2. <i>Le choix des ENR (Energies Renouvelables) :</i> .....                                                                                                | 18 |
| 3. <i>Etat de l'art de la filière hydrogène</i> .....                                                                                                      | 19 |
| a) Pourquoi l'hydrogène ? .....                                                                                                                            | 19 |
| b) Production et Consommation d'hydrogène .....                                                                                                            | 21 |
| B. L'ANALYSE DES CONDITIONS RELATIVES A LA MISE EN PLACE D'UN RESEAU DEMONSTRATIF DE BUS A HYDROGENE SUR LA FUTURE 4-VOIES « LA ROUTE DES TAMARINS » ..... | 23 |
| 1. <i>L'étude</i> .....                                                                                                                                    | 23 |
| a) Description.....                                                                                                                                        | 23 |
| b) Objectifs .....                                                                                                                                         | 24 |
| c) Caractéristique .....                                                                                                                                   | 25 |
| d) Intérêts .....                                                                                                                                          | 26 |
| e) Problématique .....                                                                                                                                     | 27 |
| 2. <i>Phases</i> .....                                                                                                                                     | 27 |
| a) PHASE 1 / Recherche documentaire (papier et Web) et assemblage de synthèse.....                                                                         | 27 |
| b) PHASE 2 / Enquête Diagnostic .....                                                                                                                      | 28 |
| c) PHASE 3 / Orientation et Proposition .....                                                                                                              | 28 |
| d) PHASE 4 / Finalisation rapport de stage global.....                                                                                                     | 28 |
| 3. <i>Etat d'avancement</i> .....                                                                                                                          | 28 |
| a) Les technologies .....                                                                                                                                  | 28 |
| b) Les projets de réseaux.....                                                                                                                             | 34 |

|       |                                                                                             |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| c)    | Les déplacements.....                                                                       | 35 |
| d)    | 1er dimensionnement .....                                                                   | 40 |
| e)    | Nuance autocar/autobus.....                                                                 | 41 |
| f)    | Réseaux réunionnais.....                                                                    | 41 |
| g)    | L'intégration des énergies renouvelables .....                                              | 43 |
| C.    | L'ELABORATION DE PARTENARIATS TECHNIQUES ET FINANCIERS AFIN DE PERENNISER LE PROJET .....   | 46 |
| D.    | ROLE TRANSVERSE : LA COORDINATION DU GROUPE HYDROGENE.....                                  | 49 |
| E.    | ROLE TRANSVERSE : ASSISTANCE DANS LE MONTAGE DU BUSINESS PLAN DE LA FILIERE HYDROGENE ..... | 50 |
| F.    | LE DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE FILIERE .....                                               | 52 |
| VIII. | CONCLUSION.....                                                                             | 53 |
| IX.   | BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE .....                                                          | 54 |

## II. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes m'ayant aidé ou intégré durant ce stage, de près ou de loin, pour leur sympathie et leur compréhension :

Au sein de l'ARER :

- Christophe Rat, directeur de l'ARER
- Anthony Lefebure, stagiaire de l'ESTACA en binôme sur le sujet ; Alexandre Anselmo, Julien Madec, François Roulet, stagiaires en projet de fin d'études au sein de la filière hydrogène de l'ARER
- L'équipe ARER et les stagiaires de la Plate Forme Recherche & Développement, en particulier Mathieu Accadebled

Ainsi que :

- Sébastien Boyer, à l'Animation de Sciences Réunion
- Bertrand Cancre, du CNFPT Centre National de Formation de la Fonction Publique
- Jean Jacques Fung, Responsable Génie Civil et Insertion Urbaine du Tram-Train à la SR21
- Claude Gindrey, anesthésiste au CHD de St Denis
- Sylvie Hoarau, du centre d'intelligence économique D6-SR21
- Maurice H. Kaya, du DBEDT Department of Business, Economic Development and Tourism de Hawaï
- Ibrahim Mooland, de la société Mooland Transports Osmann SA
- Amine Mooland, président du directoire du GIE EVOTRANS
- Gilbert Morlet, directeur opérationnel du projet « Route des Tamarins » à la DDE
- Thomas Quinn, directeur du HCATT Hawaii Center for Advanced Transportation Technologies de Hawaï
- Jón Björn Skúlason, directeur du projet islandais ECTOS Ecological City TranspOrt System
- Daniel Thébault, directeur des transports, déplacements et voirie au TCO Territoire de la Côte Ouest, et vice-président de l'AITF Association des Ingénieurs Territoriaux de France
- Simon Whitehouse, directeur du projet australien STEP Sustainable Transport Energy Project

### III. EMPLOI DU TEMPS ET RESUME DES TACHES EFFECTUEES

Emploi du temps : horaires normaux de bureau, du 24/05/2004 au 27/11/2004.

Tâches effectuées :

- L'analyse des conditions relatives à la mise en place d'un réseau démonstratif de bus à hydrogène sur la future 4-voies « La Route des Tamarins »
- L'élaboration de partenariats techniques et financiers afin de pérenniser le projet
- Rôle transverse : la coordination du groupe hydrogène

## IV. RESUMES DU STAGE – FRANÇAIS, ANGLAIS

### **Filière hydrogène - Examen des conditions de mise en place d'un réseau de bus en flotte captive sur la future 4-voies de l'île de La Réunion**

La mise en place d'un réseau de bus à hydrogène nécessite une attention particulière sur les plans législatif et économique. Les lois concernant la manipulation de l'hydrogène sont strictes mais les connaissances déjà acquises par l'expérimentation d'autres bus dans le monde aident à résoudre certaines difficultés. Comme toute technologie nouvelle, son exploitation reste encore chère. D'ailleurs, le processus d'élaboration de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables est non polluant mais nécessite des infrastructures supplémentaires, qui seront étudiées dans le cadre du projet. La recherche développement portera plus particulièrement sur la mise en place d'un réseau de bus en flotte captive sur la route des Tamarins, entre Saint-Denis et Saint-pierre, en prenant comme hypothèse la réalisation à terme de la route des tamarins et la réalisation du Tram Train entre Saint-Benoît et Saint-Paul. Il sera examiné la question de l'inter modalité entre ces deux types de transport.

### **Study for a demonstrative Fuel Cell Bus Fleet on the highway of La Réunion Island.**

The characteristics of La Réunion Island energy dependence make us think about a new way to provide energy from renewable resources, and to use new energy vectors, such as hydrogen, similar to electricity but permitting storage and transport within the use as a fuel. Developing a fuel cell bus fleet requires a special care of legislature and economic plans. Laws concerning hydrogen handling are strict but different projects are operating all around the world and help to overcome the major difficulties. New technologies are quite expensive to operate. Besides, production of hydrogen coming from renewable energies is emission free (of CO<sub>2</sub>) but additional infrastructures must be developed. Buses system will fit in with La Réunion because insular partners will be integrated into the project connecting cities of Saint-Denis and Saint-Pierre. The principal assumption is the achievement of the highway "La Route des Tamarins" and the Tram-Train between Saint-Benoît and Saint-Paul. The inter-connection between these two different types of transport will be examined.

## V. INTRODUCTION

J'ai toujours été intéressé par le secteur des transports d'une part, et par les modes de propulsion des véhicules terrestres d'autre part. La proposition d'un Projet de Fin d'Etudes dans le cadre d'études sur un réseau de bus à hydrogène m'a apparu comme très intéressant, d'autant plus que cette technologie m'intéressait particulièrement; ayant eu une formation sur les moteurs à combustion interne mais non sur les modes de propulsion alternatifs. Travailler sur le mode de propulsion du futur qu'est l'hydrogène a donc suscité un fort engouement de ma part, par intérêt personnel et pour solidifier et diversifier mon expérience et mes connaissances des modes de propulsion.

Plusieurs autres aspects de ce semestre d'étude m'ont également attiré : travailler dans le secteur plus particulier des transports en commun, du côté « organisation » ; et avoir une expérience en coordination-management. Enfin, j'ai pensé qu'effectuer un stage de niveau ingénieur dans une petite association me permettrait de découvrir d'autres fonctions de l'entreprise, et me donnerait une meilleure vision des différents aspects que peuvent refléter mon futur métier, ayant effectué l'année précédente mon stage ingénieur dans une grande multinationale.

Ce projet de fin d'études de 6 mois possède donc plusieurs facettes variées et complémentaires, tout en restant dans le domaine de la propulsion et des transports.



## VI. L'ARER : l'Agence Régionale de l'Énergie Réunion

### A. Organisation générale

*L'Agence Régionale de l'Energie Réunion (ARER) est une association de loi 1901 à but non lucratif créée en décembre 2000. Cette association est présidée par Monsieur Paul VERGES, Président du Conseil Régional de la Réunion.*



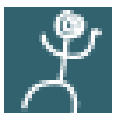
*Cette association est financée par des membres de droit : Région Réunion, EDF, ADEME, CESR, CCEE, CIVIS, et Commune de Saint-Leu (L'Union Européenne apporte son soutien financier au titre du programme « SAVE » 'Specific Action for Vigourous Economy' ; ainsi que des membres associés : SIDR, Commune de Mamoudzou, Commune de Sainte-Marie, Commune de Sainte-Suzanne, Commune de Petite-Île, SIDELEC Réunion, Chambre de métiers, et la SAPHIR.*



#### 1. Objectifs



Les objectifs de l'ARER sont de promouvoir et développer l'utilisation des énergies renouvelables disponibles sur le territoire (énergie des vagues, énergie éolienne, énergie solaire, énergie géothermique, micro hydraulique) et la maîtrise de l'énergie.



Pour l'île de la Réunion, les récentes évolutions législatives permettent aux collectivités la promotion d'une politique régionale énergétique de long terme fondée sur la notion de développement durable. L'objectif proposé par le Conseil Régional est d'assurer sur le long terme une sécurité durable de l'approvisionnement en énergie, en ayant recours à des ressources locales et non polluantes : selon le P.R.E.R.U.R.E, le Plan Régional des Énergies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie, la cible est d'atteindre en 2025 l'autonomie de l'île pour la production d'électricité.

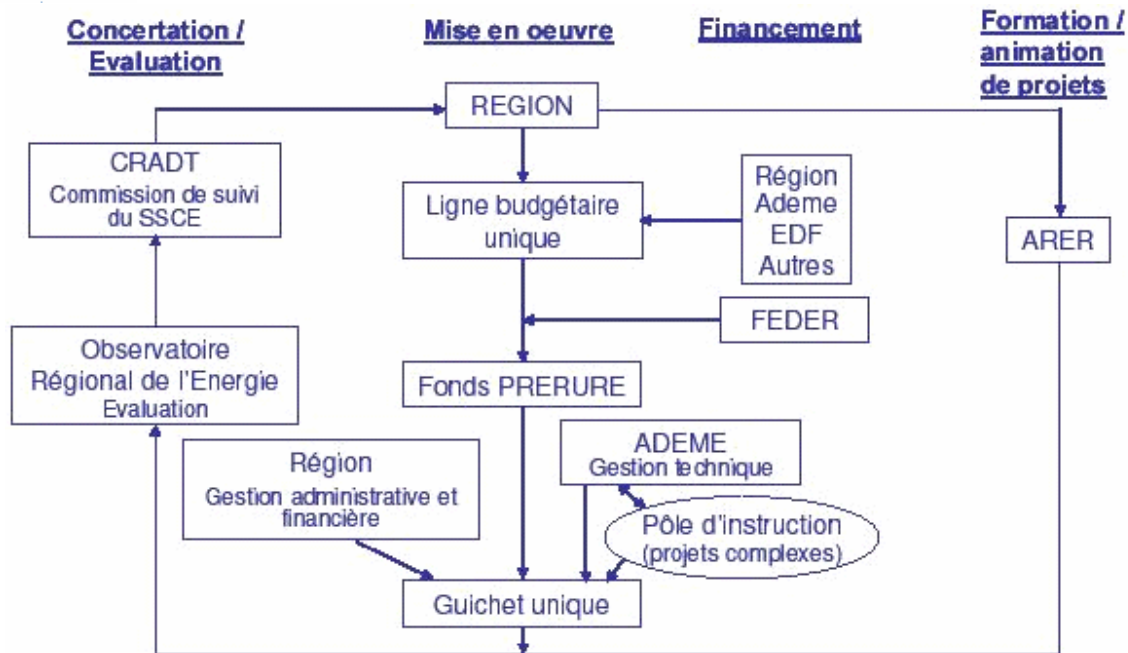


Figure 1: schéma organisationnel du P.R.E.R.U.R.E

## 2. Missions

L'équipe de l'ARER, pour répondre à ces objectifs, développe plusieurs axes de missions :

- Information du grand public
- Aide technique et logistique aux porteurs de projets pour intégrer l'utilisation rationnelle de l'énergie, les énergies renouvelables et les concepts bioclimatiques dans leurs réflexions
- Faire le lien entre porteurs de projets et professionnels de l'énergie
- Soutenir, à La Réunion et dans l'Océan Indien, le développement des filières technologiques liées aux Energies Renouvelables et à l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
- Promouvoir les métiers de l'énergie et l'insertion professionnelle
- Fédérer et animer un pôle de compétence pour l'Océan Indien

### 3. Les outils

Pour mener à bien ses missions l'ARER a mis en place :

- Un réseau de sites démonstratifs représentatifs des technologies existantes à La Réunion
- Un réseau d'Espaces Info Energie, conseil auprès du grand public sur les économies d'énergie et les Energies Renouvelables
- Une équipe technique et une méthodologie à disposition des porteurs de projet pour les accompagner dans leur mise en œuvre
- Une banque d'outils pédagogiques à disposition de tous : expositions mobiles, jeux...
- Un centre documentaire, Observatoire de l'énergie, des technologies Energies Renouvelables et des métiers de l'énergie
- Une plate-forme stage de Recherche & Développement
- Un service de conseil gratuit au 0262 257 257 et par l'Internet.

### 4. Schéma de développement de l'ARER

Créée en 2001, la structure s'organise la première année, et développe chacun de ses pôles d'activité au fur et à mesure, pour une maturité complète 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.

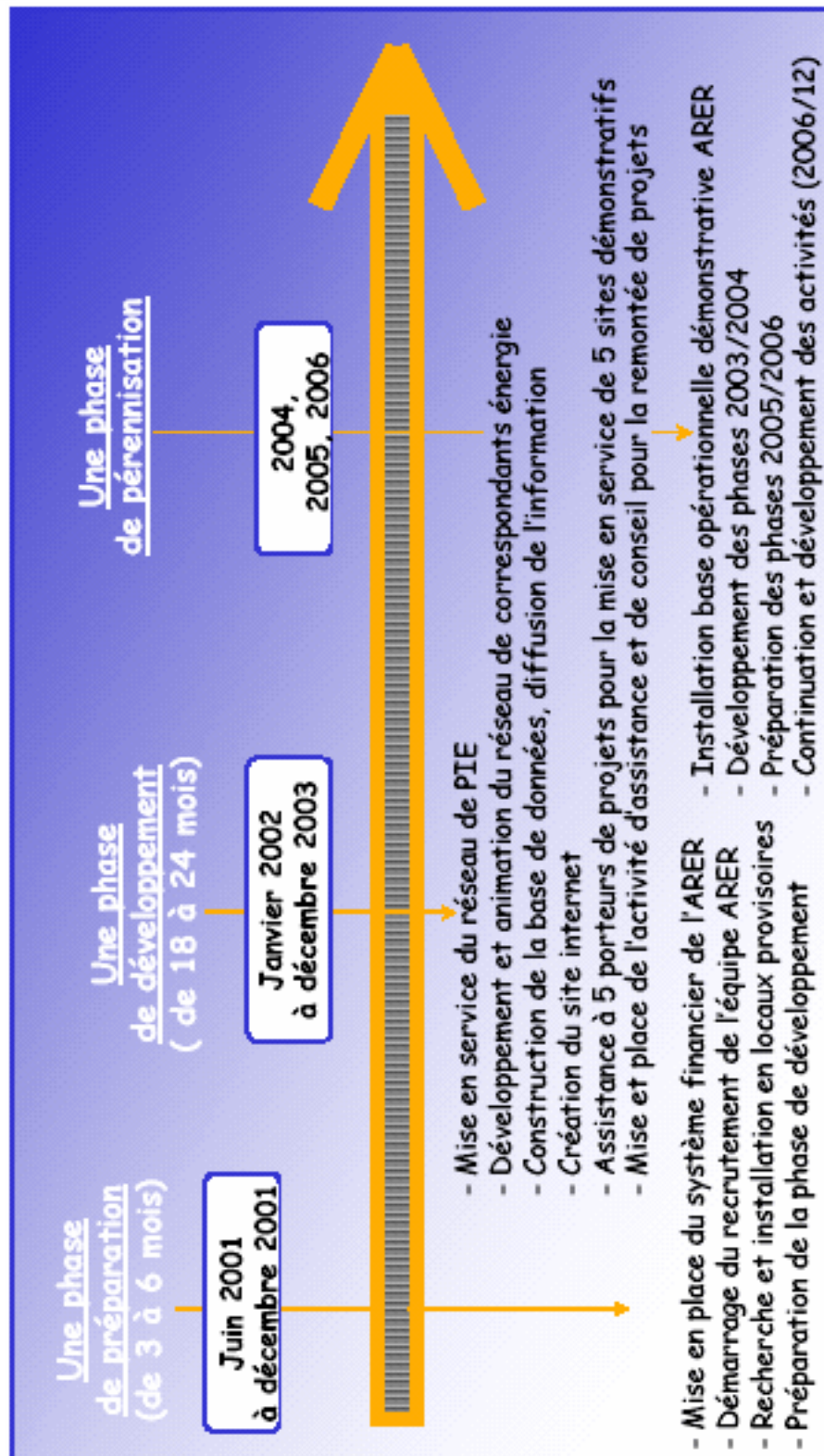


Figure 2: schéma de développement

## 5. Organigramme

### Agence Régionale de l'Energie Réunion - synoptique

• **Membres de droit :** Région Réunion, ADEME, EDF, CRES, COEE, Mairie de Saint-Leu, CIVIS  
 • **Membres Associés :** SDR, SIELEC, Commune de MAJOUZOU, Commune de STE SUZANNE, Commune de SAINTE MARIE, Commune de PETITE ILE, Chambre des Métiers

SAPHIR

• **Président ARER :** Paul VERGES

**Siège Social ARER**

Expert  
Comptable  
Cabinet ORION  
Commissaire  
aux comptes  
EXCO

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 – [arer@arer.org](mailto:arer@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 Plate Forme Recherche et Développement (PFRD) :** Gaëlle GILBOIRE – Brice COMTE – Mathieu ACCADEBLED

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 Enseignants et Développement Durable et leurs équipes associées

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

• **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

| CIMO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | DMO                           | FIL                     | PI                 | EVE          | OBS                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------|-----------------------------------------------------------|
| Conseil à Maître d'Ouvrage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Réseau de sites Démonstratifs | Filliers Technologiques | Point Info Energie | Événementiel | Observatoire des métiers et des Technologies de l'Energie |
| <b>EIE Sud « HUB »</b><br>Front de mer en face boudoir, 78<br>Boulevard Hubert de Lisie 97 410 Saint-Pierre – Tél 0262 257 257 – Fax 02 62 38 39 92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>Secteur SUD (Territoire CIVIS et CCSud)</b><br>• Responsable de Secteur : à recruter<br>suite Départ Michel VADET<br>• Responsable Espace Info Energie : Stéphane LEGROS – Technicien Conseil<br>• Corps de médiateurs mise à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement<br>• Corps de stagiaires de la Plate Forme Recherche et Développement (PFRD) : François ROULET – Alexandre PAYET – Damien AMICHAUD – Anthony LEFEBURE – Alexandre ANSELMIO |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>EIE Ouest</b><br>En cours de création – Equipe basée à HUB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>Secteur Ouest (Territoire TCO)</b><br>• Responsable de Secteur : Nicolas PICO – Chargé d'Opération<br>• Responsable Espace Info Energie : Willy ARABOUX – Technicien Conseil<br>• Corps de médiateurs mise à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement<br>• Corps de stagiaires de la Plate Forme Recherche et Développement (PFRD) : Néant                                                                                                        |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>EIE Nord</b><br>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                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>Secteur Nord (Territoire CWMOR)</b><br>• Responsable de Secteur : Patrice JULLIAN – Chargé d'Opération<br>• Responsable Espace Info Energie : Olivier MAILLOT – Technicien Conseil<br>• Corps de médiateurs mise à disposition par les Communautés d'Agglomération en cours de recrutement<br>• Corps de stagiaires de la Plate Forme Recherche et Développement (PFRD) : Vincent HEURTEL – Gilles CARNOY – Mathieu LEVEAU – Paul BYRNE – Kevin GRECET                           |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>EIE Est</b><br>A créer                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                               |                         |                    |              |                                                           |
| <b>Secteur Est (Territoire CREST)</b><br>• Responsable de Secteur : à recruter<br>• Responsable Espace Info Energie : Olivier MAILLOT – Technicien Conseil<br>• Corps de médiateurs mise à disposition par les communautés d'agglomération en cours de recrutement<br>• Corps de stagiaires de la Plate Forme Recherche et Développement (PFRD) : Néant                                                                                                                             |                               |                         |                    |              |                                                           |

## **B. La PFRD : Plate Forme Recherche & Développement**

La plate-forme stage est conduite en plusieurs phases de travail individuel par chaque stagiaire, en alternance avec des séminaires de travail collectif d'une journée (PFRD), rassemblant les partenaires, l'ARER et les stagiaires. Ces séminaires marquent des étapes dans le développement des études : synthèse documentaire, annuaire des rencontres et enquêtes terrains à mener, phase diagnostic, phase proposition, et phase de rédaction finalisée.

Des phases de travaux personnels ou par petits groupes, et des phases de regroupement collectif s'alternent ; permettant une concertation et la mise en partage des données techniques comme des méthodes. Les séminaires permettent des critiques constructives des travaux et rendus et dotent les stagiaires d'une culture des autres projets.

Les séminaires sont organisés par les stagiaires avec l'assistance de l'ARER. Chaque séminaire est assuré par un directeur d'événementiel, qui constitue son équipe au sein de la plate-forme R&D, distribue les rôles, et assure la bonne conduite globale de la journée de séminaire.

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

L'ARER assure l'encadrement méthodologique et l'apport en terme de métiers et d'expérience. Les stagiaires sont positionnés comme des chargés de mission opérant une véritable intervention professionnelle sur un sujet donné, dans un temps donné.



## VII. TRAVAUX REALISES

### A. PREAMBULE

#### 1. Contexte énergétique

##### a) Contexte énergétique mondial (Perspectives à long et moyen termes)

“Les exigences de la protection de l’environnement doivent être intégrées dans la définition et la mise en œuvre des politiques et des actions de la Communauté visées à l’article 3, en particulier afin de promouvoir le développement durable” - Article 6 du traité d’Amsterdam entré en vigueur en mai 1999. Celui-ci place désormais le concept de développement durable parmi les objectifs fondamentaux de l’Union Européenne.

Pour les décennies à venir, la croissance démographique et l’élévation du niveau de vie impliqueront une augmentation significative de la demande d’énergie mondiale : si l’on constate une certaine maturité des besoins en énergie dans les pays développés, la croissance des besoins énergétiques restera forte dans les pays en développement, notamment en Chine ou en Inde ; pays qui représenteront une part de plus en plus importante de la consommation d’énergie mondiale.

Dans cette perspective d’une croissance à long terme de la demande d’énergie, nous devons prendre en compte deux problèmes planétaires :

- **le caractère fini des ressources d’énergies fossiles**, qui couvrent aujourd’hui 90 % des besoins énergétiques mondiaux. L’hypothèse d’un pic de production pour les hydrocarbures doit être sérieusement prise en compte, même si la date à laquelle pourrait intervenir ce pic reste incertaine (2020/2030)
- **le réchauffement climatique** dû à l’émission de GES (Gaz à Effets de Serre), dont les conséquences pourraient être dramatiques à l’horizon d’un siècle. Le secteur énergétique est responsable aujourd’hui d’environ 80 % des émissions de ces gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O...)

Depuis des décennies, les déterminants majeurs de la croissance de la demande d’énergie primaire et de la consommation finale sont la production d’électricité et les besoins de mobilité. Depuis plus de quarante ans, il existe un lien étroit entre la richesse mondiale d’une part et la consommation d’électricité et le transport d’autre part. Ce sont les secteurs dont la demande croît le plus et dont les émissions de GES sont les plus élevées.

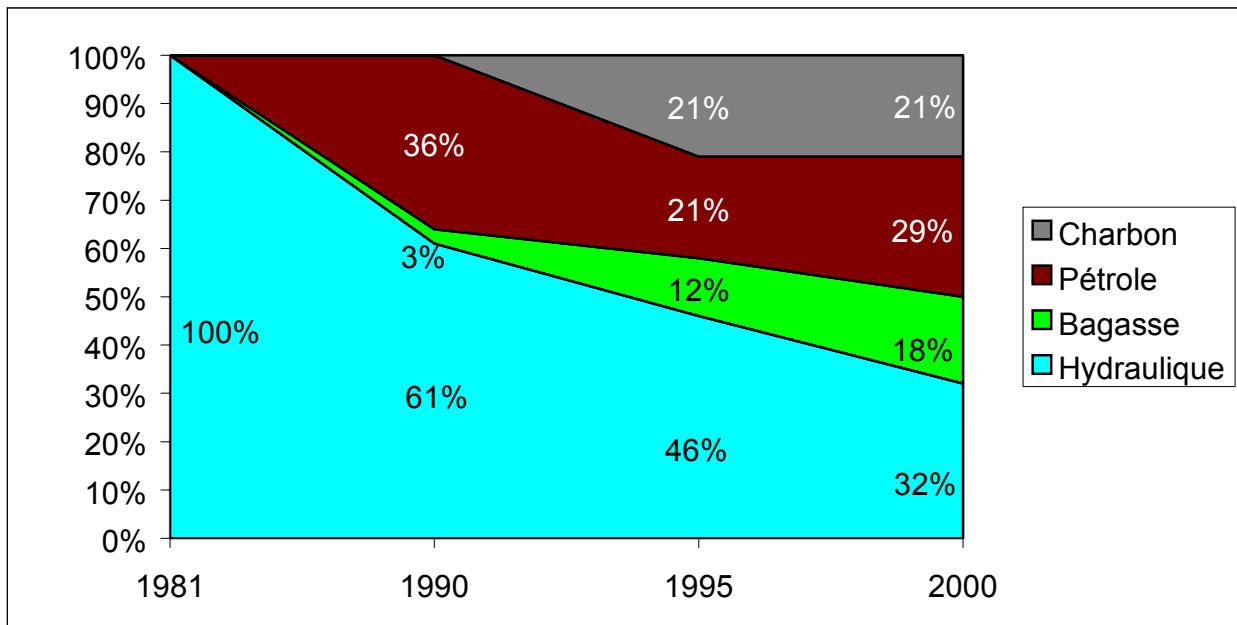
## **b) Contexte Energétique à la Réunion**

L'île de La Réunion est dépourvue de ressources en combustibles fossiles. Contrairement à l'Europe qui bénéficie d'un réseau « infini » en constante expansion, son système énergétique est isolé, ce qui implique une sécurité des approvisionnements énergétique plus marquée qu'ailleurs.

L'île doit alors valoriser une partie de son potentiel énergétique local par la production d'électricité hydraulique, l'utilisation de l'énergie solaire et de la biomasse (bagasse et bois).

En 1981, l'électricité produite à La Réunion était à 100% d'origine renouvelable, grâce à l'hydroélectricité. Ces 20 dernières années, La Réunion a vécu un remarquable développement économique et démographique. La conséquence en a été une importante augmentation de la consommation d'énergie (+350 %), essentiellement produite à base d'énergies fossiles importées (pétrole, puis charbon dès 1992). Aujourd'hui, les énergies renouvelables d'origine locale (hydraulique et bagasse) ne représentent plus « que » 50% de la production électrique du département (voir Figure 3). De plus, La Réunion connaîtra jusqu'en 2025 une croissance démographique soutenue, passant de 750 000 habitants à un million. L'accroissement de la population, combiné à l'élévation du niveau de vie et de la demande d'équipements énergivores, entraînera une inflation de la demande en électricité de l'ordre de 7 à 10% par an (8% actuellement).





**Figure 3: évolution de la répartition des énergies renouvelables et des énergies fossiles**

Au total, le bilan énergétique est fortement marqué par les importations de produits pétroliers et de charbon qui fournissent plus de la moitié de l'énergie consommée.

La croissance des approvisionnements en hydrocarbures a été très soutenue depuis 30 ans.

Elle s'est accélérée depuis le début des années 90 avec la généralisation des vols sans escales et la l'accroissement rapide du parc automobile.

Les transports interviennent pour 41% dans la consommation d'énergie en 1999.

Ils n'utilisent que des hydrocarbures et aucune énergie de substitution ne permet actuellement de répondre à leurs besoins.

Avec près de 700 000 tonnes en 2001, les importations de produits pétroliers sont en hausse plus modérée (4.5%) que l'année 2000 (qui avait connue une hausse de 8%).

On notera aussi que la consommation du parc automobile est maintenant dominée par le gazole.

En chiffres :

- Progression de 36.9% des besoins énergétiques de l'île en 5 ans ;
- En 1998, 74% des ressources énergétiques étaient importées (produits pétroliers et charbon) ;
- En 1999, 636 691 tonnes de carburants ont été consommées, soit une progression de 4.6% par rapport à 1998 ;

- En 2000, la production brute d'électricité était de 1 757 millions de KWh, fournie par l'hydroélectricité (32%), les centrales thermiques charbon-bagasse du Gol et de Bois Rouge (49%), et les produits pétroliers (19%) ;
- Les énergies renouvelables (hydraulique et bagasse) ont vu leur part dans la production électrique fléchir en 2000 : 50% contre 58% en 1995, 64% en 1990.

L'objectif pour l'île est donc :

- d'inverser la tendance observée ces 20 dernières années (augmentation significative de la consommation d'énergie fossile),
- de favoriser le co-développement avec les pays de son environnement dans le cadre des objectifs de Johannesburg (ex : éolien à Madagascar et Rodrigues),
- d'inscrire dans sa démarche le protocole de Kyoto afin de lutter contre le changement climatique qui menace en premier lieu les petits territoires insulaires.

## 2. Le choix des ENR (Energies Renouvelables) :

A La Réunion, l'électricité la moins chère sur le réseau est produite par les centrales hydroélectriques et la plus chère par les turbines à combustion. Outre un avantage économique difficile à chiffrer, les énergies renouvelables représentent surtout une autonomie énergétique et une sécurisation du coût d'approvisionnement par rapport à un marché mondial énergétique fluctuant.

Par ailleurs, les énergies renouvelables disposent à La Réunion de conditions favorables à leur développement :

- Quantité disponible importante, notamment pour l'énergie solaire (5,7 kWh/m<sup>2</sup>.jour) et avec une bonne répartition tout au long de l'année du fait de la proximité de l'Equateur,
- Existence de ressource complémentaire (géothermie haute température grâce à l'activité volcanique),
- Ressource disponible à coût quasi-nul (la bagasse : le résidu des cannes à sucre après exploitation).

Les enjeux du développement des énergies renouvelables à La Réunion sont nombreux :

- Préservation de l'environnement, de la qualité du territoire et des activités économiques qui en découlent (tourisme, etc).
- Développement économique :

- Création d'emplois associés au développement des énergies renouvelables et de la Maîtrise De l'Energie (MDE),
- Acquisition d'une technologie et d'un savoir-faire local réunionnais,
- Exportation de ce savoir-faire en Afrique et dans l'Océan Indien.

Plusieurs axes stratégiques d'actions ont donc été définis :

- L'amélioration du contexte législatif, administratif et procédural afin de faire émerger des projets pérennes et fiables,
- La limitation de la consommation d'énergie par la mise en œuvre d'une maîtrise globale de la demande en énergie,
- L'émergence de filières d'énergies renouvelables de qualité à La Réunion,
- L'émergence d'un comportement éco-responsable de la population.

### 3. Etat de l'art de la filière hydrogène

#### a) Pourquoi l'hydrogène ?

L'hydrogène est un gaz connu depuis fort longtemps. En effet, les alchimistes l'appelaient l'«air inflammable» et l'obtenaient par traitement de la limaille de fer avec de l'acide sulfurique. Ses propriétés furent précisées par Cavendish en 1766 et c'est Antoine Lavoisier qui lui donna son nom en 1783 en constatant que sa combustion avec l'oxygène donnait de l'eau : du grec "hydro"(eau) et "gene" (producteur, créateur).

Plus petit atome de la classification périodique, il est d'abord très léger, masse atomique 1.0072, soit 14 fois plus léger que l'air.

Cette faible densité lui prête une grande facilité de diffusion à travers les parois métalliques et d'effusion à travers les substances poreuses : on y voit là une des premières contraintes au niveau de son stockage.

Dans la nature, il apparaît sous forme de gaz : le dihydrogène ( $H_2$ ), qui est couramment connu sous le nom d'« hydrogène » par abus de langage. C'est un gaz incolore, inodore et non toxique. L'hydrogène est aussi l'un des éléments les plus abondants de la planète, mais souvent combiné avec d'autres atomes : l'oxygène (O) dans le cas de l'eau ou le carbone (C) dans le cas du gaz naturel et des hydrocarbures. Il est à noter que l'hydrogène est un *vecteur énergétique* au même titre que l'électricité et non une énergie primaire, comme l'est par exemple le pétrole, qu'il faut produire et stocker pour que l'on puisse l'utiliser ultérieurement. Ainsi, et contrairement aux hydrocarbures, il n'existe pas de gisements permettant de l'extraire directement, ce qui posera une contrainte sur sa production (électrolyse, reformage, etc). La molécule d'hydrogène est

très stable thermiquement, ce qui explique sa faible réactivité à basse température. Il est donc nécessaire d'amorcer les réactions à chaud ou utiliser un catalyseur qui favorise sa dissociation.

Il possède une densité d'énergie élevée: 120 MJ/kg, c'est-à-dire sensiblement trois fois celui des hydrocarbures (45 MJ/kg pour le pétrole) et quatre fois et demie celui du charbon. Autre problème, c'est, après l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier: sa température de liquéfaction est en effet de  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

FORMULE PHYSIQUE :  $\text{H}-\text{H}$

Plusieurs technologies existent ou sont en cours de recherche et sont capables de produire l'hydrogène, dont les principales sont :

- La production d' $\text{H}_2$  via les combustibles fossiles (par reformage du gaz),
- Le nucléaire par électrolyse ou craquage de l'eau,
- Les énergies renouvelables par électrolyse de l'eau.

Nous retiendrons cette dernière technologie, puisqu'elle présente le cycle de vie le plus propre.

Fabriqué par électrolyse, le dihydrogène ( $\text{H}_2$ ) consomme de l'eau et rejette de l'oxygène dans l'atmosphère.

A l'inverse, lorsqu'il est utilisé, il consomme de l'oxygène et restitue de l'eau dans l'environnement.

- **Electrolyseur** :  $\text{Electricité} + 2 \underset{\text{liq}}{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow 2 \underset{\text{gas}}{\text{H}_2} + \underset{\text{gas}}{\text{O}_2}$
- **PAC** (Pile A Combustible), réaction inverse :  $2 \underset{\text{gas}}{\text{H}_2} + \underset{\text{gas}}{\text{O}_2} \rightarrow \text{Electricité} + 2 \underset{\text{gas}}{\text{H}_2\text{O}} + Q$

Et pour peu que l'énergie utilisée dans ce cycle soit d'origine renouvelable, le carbone disparaît totalement du paysage énergétique.

A noter que toute quantité d'énergie qui passe du stade de l'énergie primaire à un autre suit une série de processus de transformation et de transports, c'est-à-dire une chaîne énergétique. Et dans ce cas, les rendements (et donc les pertes) s'accumulent plus la chaîne est longue. L'énergie « hydrogène » s'est conservée, mais s'est dégradée, conformément au second principe de la thermodynamique. Cependant son avantage est d'être d'origine propre et surtout d'être stockable, au contraire de l'électricité dont le stockage est fastidieux, lourd et encombrant, polluant (métaux lourds des batteries) et limité. Toutes ces chaînes ne sont donc pas viables économiquement, l'électricité ayant pour origine les ENR étant encore chère.

L'hydrogène comme nouveau maillon de la chaîne, apparaît alors comme vecteur énergétique capable de répondre aux différents besoins finaux en énergie sous diverses applications :

- que ce soit dans l'utilisation directe de l'hydrogène dans les moteurs à combustion (BMW par exemple) sous forme d'énergie mécanique,
- sous forme thermique, lorsque l'hydrogène est couplé à une pile à combustible (cogénération),
- ou sous forme électrique, toujours par le biais d'une pile à combustible.

Comme pour toute rupture technologique, les freins sont de plusieurs natures: politique, économique, technique et réglementaire, auxquels on peut ajouter un frein social lié à l'acceptabilité du public.

## **b) Production et Consommation d'hydrogène**

Sa production représente aujourd'hui 500 Milliards de  $\text{Nm}^3$ , soit 6,5 EJ ( =  $10^6$  GJ = 278GWh). Or la demande mondiale en énergie primaire est de 400 EJ, dominée majoritairement par le pétrole et le charbon. Ce qui signifie que la production actuelle ne recouvrirait que 1,5% de la demande, il y a donc beaucoup à faire du côté de la production pour que l'hydrogène atteigne une part significative, surtout avec une demande énergétique mondiale en pleine croissance.

De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96% à partir d'énergie fossile, principalement à base de gaz naturel qui est la voie la plus économique (reforming).

D'autres méthodes de production existent :

- l'**oxydation partielle** (naphta, charbon, hydrocarbures lourds..),
- l'**électrolyse** (2-3% de la production),
- co-produit dans la fabrication d'**éthylène**.

L'hydrogène est utilisé dans l'industrie et dans la pétrochimie depuis des années dans l'élaboration d'ammoniac, de méthanol, de verre, savon (Figure 4).

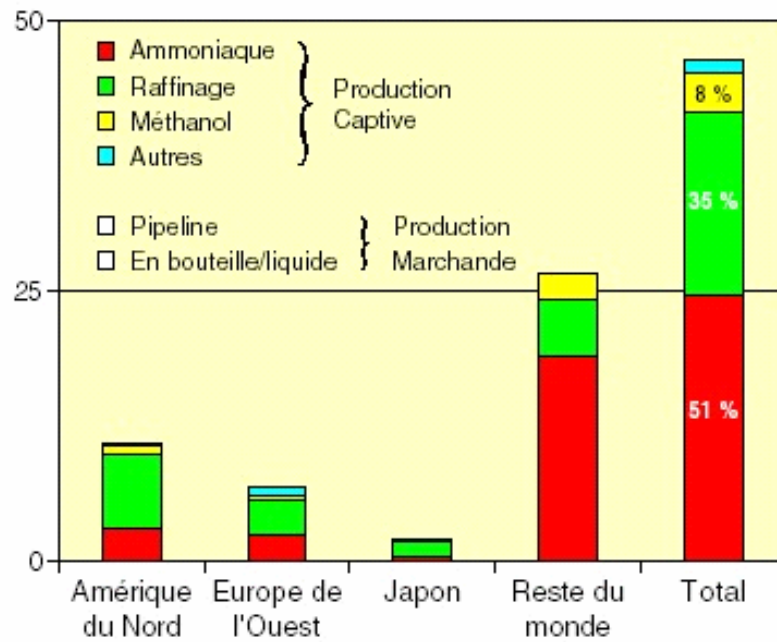


Figure 4: Principaux marchés de l'hydrogène

Mais aujourd'hui, l'engouement autour de l'hydrogène le plus perceptible se trouve dans les applications mobiles (automobile et High-tech) et stationnaire (production collective ou domestique d'électricité) utilisant l'hydrogène non plus comme molécule chimique mais bien comme énergie.

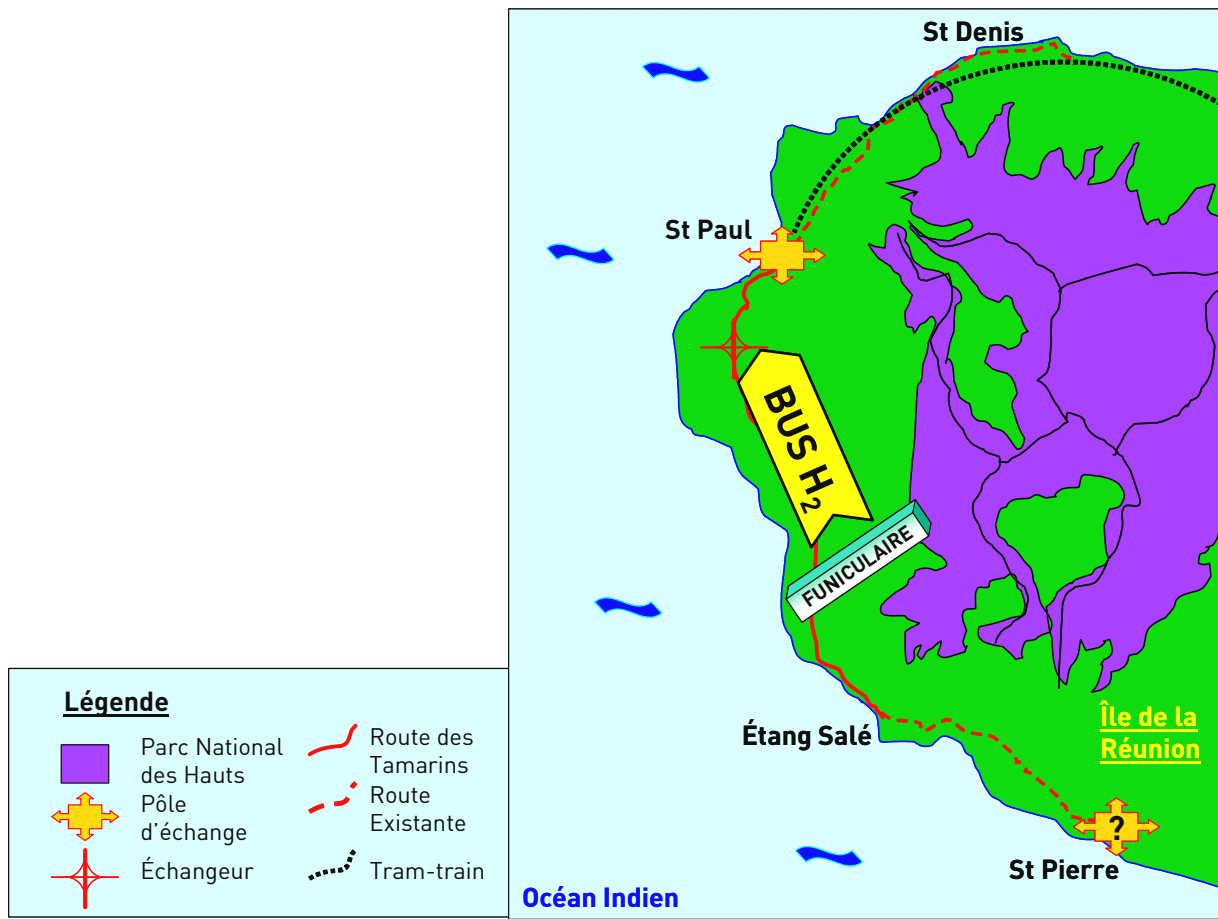
**B. L'ANALYSE DES CONDITIONS RELATIVES A LA MISE EN PLACE D'UN RESEAU DEMONSTRATIF DE BUS A HYDROGENE SUR LA FUTURE 4-VOIES « LA ROUTE DES TAMARINS »**

**NB** : de nombreux rapports et présentations sont disponibles en téléchargement sur le site Web de l'ARER : [www.arer.org](http://www.arer.org) – rubrique PLATE-FORME METIERS / Plate-forme stage R&D.

1. L'étude

a) Description

Il s'agit d'étudier tous les premiers éléments relatifs à l'étude prospective suivante :



Etant donnés les éléments ci-dessous:

- Il existe une 4 voies (2x2 voies) reliant St Pierre à Etang Salé, et une 4 voies reliant St Paul à St Denis

- La Route des Tamarins offrira la continuité d'un trajet sur voie rapide sur l'axe Nord-Sud St Denis-St Pierre
- Un projet envisage de relier l'Est au Nord et à l'Ouest via un Tram-train TCSP (Transport en Commun sur Site Propre) entre St Benoît et St Paul
- A St Paul, il est envisagé de construire un pôle d'échange pour permettre le transfert des passagers des différents modes de transports

L'étude se penche sur:

- Les conditions d'implantation d'une première flotte démonstrative de bus à hydrogène sur la Route des Tamarins de St Denis à St Pierre via St Paul

### b) Objectifs

- Introduire la technologie hydrogène dans le domaine des transports à La Réunion via une première étape démonstrative, et ainsi amorcer la volonté européenne relative à la réduction des GES (Gaz à Effets de Serre) et à l'indépendance énergétique :

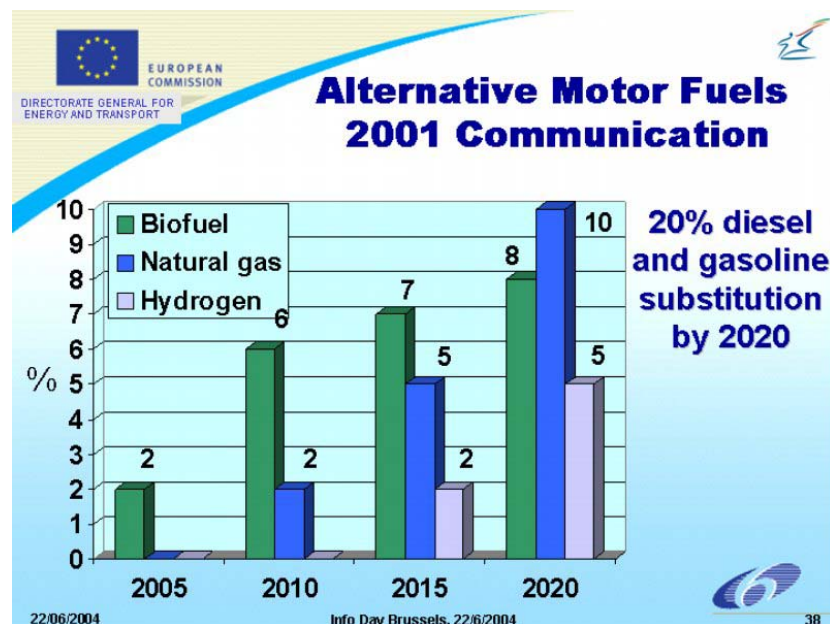


Figure 5: Commission Européenne - deadlines pour l'introduction progressive des moyens de transports à énergie alternative

- En conséquence, aborder les thèmes d'études du dimensionnement technique du premier réseau démonstratif de bus à hydrogène sur l'Île de La Réunion:
  - Le réseau



- La production propre
  - « Station service Hydrogène » : distribution et stockage
- Création de partenariats pour pérenniser le projet

### c) Caractéristique

A La Réunion, nous nous sommes donnés un critère environnemental fort, en choisissant d'étudier le projet sous un aspect : « 100% propre du puits à la roue ».

## Une filière propre: production d'hydrogène

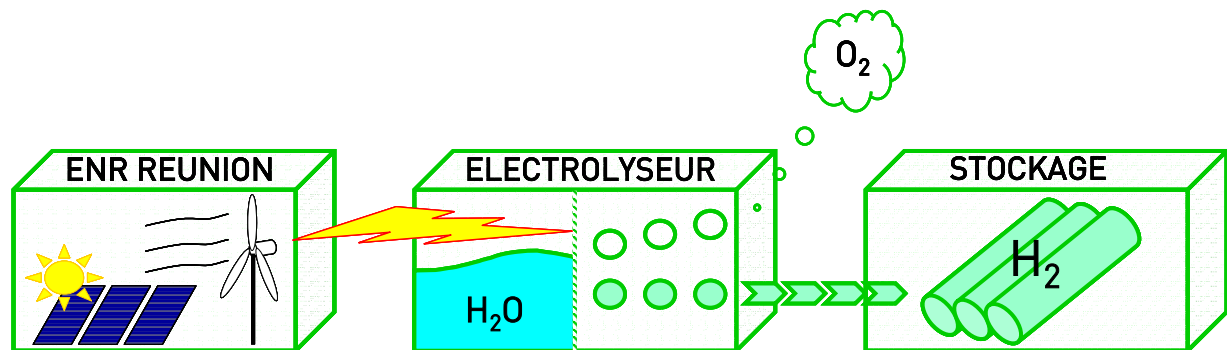
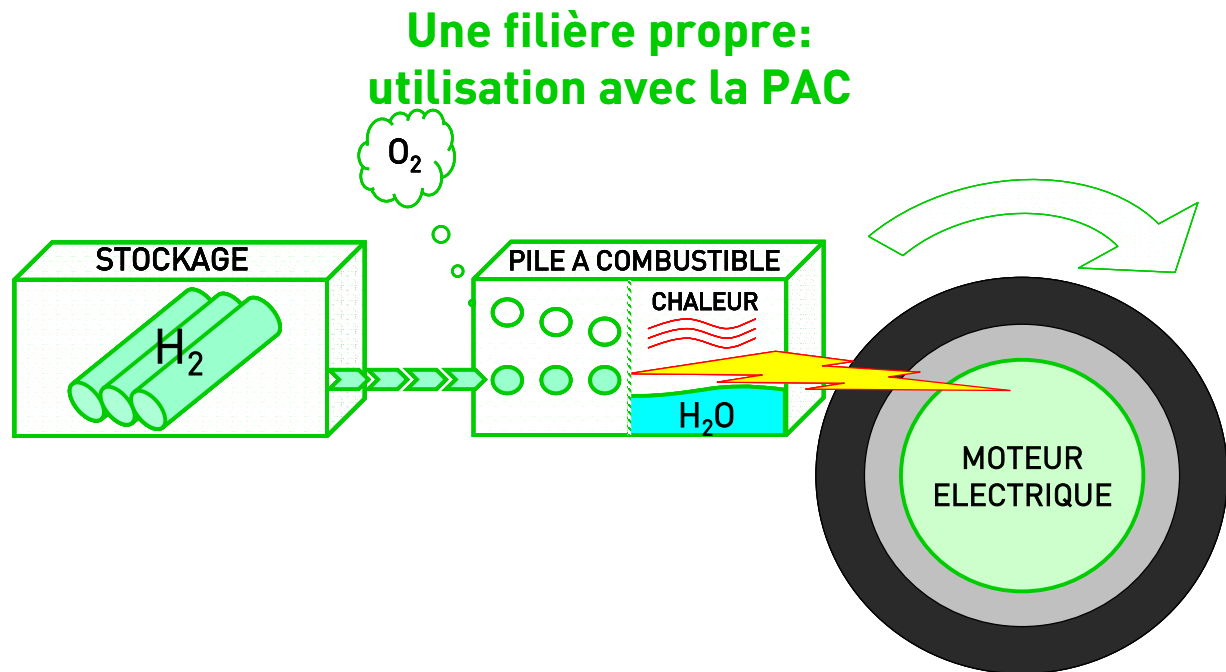


Figure 6: production propre d'hydrogène

La production d'hydrogène est assurée par un électrolyseur, dont la source électrique sont les ENR Réunionnaises (surtout le PhotoVoltaïque et l'éolien, mais l'énergie des vagues, la géothermie et la micro hydraulique sont également envisagées).

On obtient deux produits :

- de l'oxygène gazeux, qui est rejeté dans l'air (l'air est constitué à 18% d'oxygène gazeux),
- d'hydrogène gazeux à 1 bar, qui est compressé à une pression de 350 bars la plupart du temps, puis stocké en bouteilles.



**Figure 7: utilisation propre de l'hydrogène**

La production d'énergie à bord du véhicule se fait via une PAC (Pile A Combustible). En produits entrants :

- on retrouve l'hydrogène compressé en bouteilles,
- l'oxygène, capté dans l'air ambiant.

La production de la PAC est :

- de l'électricité, qui alimente un moteur électrique, et fait avancer le véhicule,
- de la chaleur, parfois réutilisée dans certains systèmes,
- de l'eau sous forme gazeuse, rejetée dans l'air par un pot d'échappement.

Ainsi, depuis la production de l'électricité primaire jusqu'à l'utilisation, la filière est propre et sans rejets nocifs ou polluants.

#### **d) Intérêts**

- Respecter le Plan Régional des Energies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (P.R.E.R.U.R.E.)
- Introduire la technologie hydrogène dans le secteur des transports à La Réunion, qui représente plus de 50% des importations d'hydrocarbures

### **e) Problématique**

Les différents aspects de la problématique sont les suivants :

- Intégration des énergies renouvelables
- Nuance Autocar / Autobus
- Réseaux structurés et problèmes institutionnels
- Rupture de charge entre les différents moyens de transport

## **2. Phases**

Voici les phases suivies lors des 6 mois de travail à l'ARER ; les parties suivantes du rapport résumeront la collecte et l'analyse des informations, ainsi que le travail de dimensionnement et de recherche de partenariats effectués.

### **a) PHASE 1 / Recherche documentaire (papier et Web) et assemblage de synthèse**

Sur la base du centre documentaire et du Web, chaque stagiaire, constitue sur le thème de son stage, et plus particulièrement sur le ou la filière technologique Energies Renouvelables qu'il aura à intégrer :

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

### **b) PHASE 2 / Enquête Diagnostic**

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

### **c) PHASE 3 / Orientation et Proposition**

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

### **d) PHASE 4 / Finalisation rapport de stage global**

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

## **3. Etat d'avancement**

### **a) Les technologies**

#### **[1] Pile à combustible ou Moteur à hydrogène ?**

Les modes de propulsion à hydrogène offrent deux possibilités :

- La PAC qui a un bon rendement, est 100% propre mais ne bénéficie pas encore d'une maturité technologique suffisante pour que l'industrialisation ait diminué les coûts de façon suffisante, et qui nécessite un remodelage du véhicule et de ses organes ;
- Le MCI H<sub>2</sub> (Moteur A Combustion Interne à Hydrogène), dont le rendement est moins bon, et qui émet encore des NO<sub>x</sub> (mais pas de CO<sub>2</sub>) en proportion moindre; mais dont la facilité d'adaptation sur des moteurs performants permet l'introduction de la technologie hydrogène dans les transports plus facilement. On notera que BMW vient de sortir un véhicule à MCI H<sub>2</sub> dont le système de distribution

(entièrement variable, le *Valvetronic*) est si raffiné qu'il brûle son hydrogène à des températures où la formation de NOx ne se produit pas.

Les bus et autocars, de par leur coût d'achat élevés, permettent des investissements technologiques plus facilement que des véhicules particuliers. De même, la « démonstrabilité » des transports en commun par rapport aux citoyens est un plus pour investir dans des transports en commun à mode de propulsion alternatif.

Ainsi, le choix se porte sur une PAC, de type PEMFC (Proton Exchange Membran Fuel Cell, Pile A Combustible à membrane échangeuse de protons). Caractéristiques :

- Température de fonctionnement : 80°C
- Rendement : 40 à 60%
- Puissance : jusqu'à 250kW

## (2) Les bus H2 : historique

Les premiers engins à être équipés d'une PAC furent 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).

Les pionniers :

- **1967**: *Electrovan*, 5kW
- **1970**: *Austin A-40*, 6kW



Figure 8: Austin A-40



Figure 9: Electrovan

Le développement (liste non exhaustive) :

- **1992**: *ZEV (Zero Emission Vehicle)*, prototype lancé par Ballard

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 à propos 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.



Figure 10: Zero Emission Vehicle

- **1999:** *Neoplan*, 40 kW+NiMH
- **2000:** *Neoplan*, 80 kW+100 kW Volant d'inertie

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).

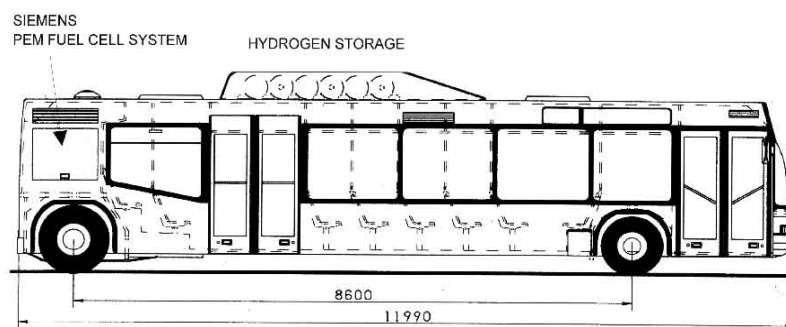


Figure 11: Neoplan

- **1994-2000:** Daimler-Chrysler, dont le *NEBus*, (*No Emission Bus*), par Daimler-Chrysler et Ballard, 250 kW

Prototype de Daimler-Chrysler, 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 pour une vitesse maximale de 80km/h. Plus de 12 000 km ont été accumulés sur ce prototype qui est le précurseur du bus Citaro des projets CUTE (cf.VII. B. 3. b)) et ECTOS.

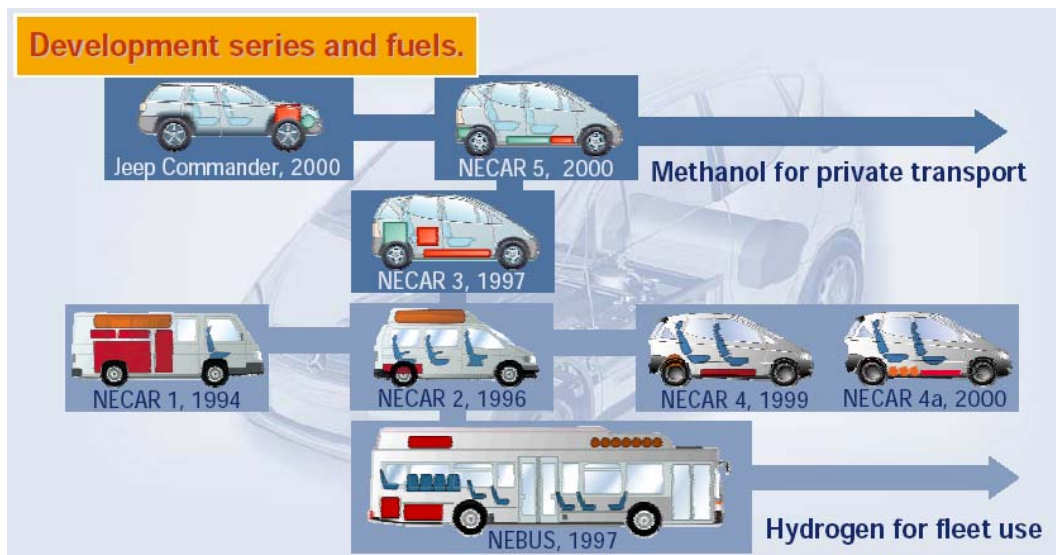


Figure 12: Développement des véhicules à hydrogène, Daimler-Chrysler

- **2001:** *Project Thor Thunder Power Bus*, 60 kW+NiPb, San Diego  
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.



Figure 13: Project Thor Thunder Bus

- **2001:** *IRISBUS City Class FC*, 60kW+NiPb, Turin  
Equippé 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.





Figure 14: IRISBUS City Class FC

- **2002:** *China DICP-Bus*, 30 kW

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.



Figure 15: China DICP-Bus

### [3] Les bus H<sub>2</sub> : véhicules récents

- **2001:** *Toyota FCHV-BUS1*, 90 kW+NiMH
- **2002:** *Toyota FCHV-BUS2*, 2\*90 kW

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 à 350 bars, pour une autonomie de 350 km et une vitesse maximale de 80km/h.



### FCHV-BUS2 Main Specifications

| Vehicle     | Name                                  | FCHV-BUS2                                         |
|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|
|             | Base platform                         | Blue Ribbon City<br>(High low-floor commuter bus) |
|             | Overall length/<br>width/ height (mm) | 10,515/2,490/3,360                                |
|             | Occupant capacity (persons)           | 60                                                |
| Performance | Max cruising range (km)               | 250                                               |
|             | Maximum speed (km/h)                  | 80                                                |
| Fuel cell   | Name                                  | Toyota FC Stack                                   |
|             | Type                                  | Polymer electrolyte fuel cell                     |
|             | Output (kW)                           | 90×2                                              |
| Motor       | Type                                  | Permanent magnet                                  |
|             | Maximum output (kW (ps))              | 80 (109) ×2                                       |
|             | Maximum torque (N·m (kg·m))           | 260 (26.5) ×2                                     |
| Fuel        | Type                                  | Hydrogen                                          |
|             | Storage method                        | High-pressure hydrogen<br>storage tank            |
|             | Maximum storage pressure (bar)        | 35                                                |
| Battery     | Type                                  | Nickel-metal hydride                              |

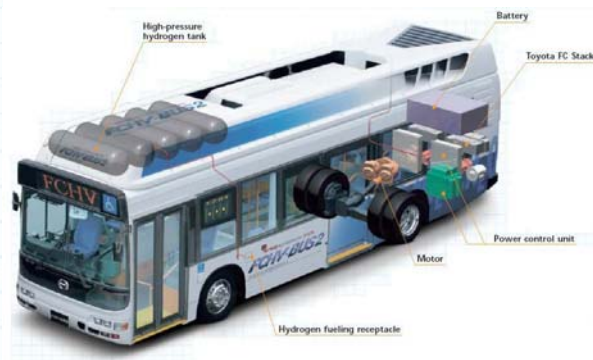


Figure 16: Caractéristiques du Toyota FCHV-BUS2

Figure 17: Toyota FCHV-BUS2

- **2002:** *Citaro*, Daimler-Chrysler et Ballard, 200kW

Présenté en 2002, ce bus de conception Daimler-Chrysler, est dans la continuité du *Nebus*. 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).

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 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)  |



Figure 18: Caractéristiques du Daimler-Chrysler Citaro Figure 19: Daimler-Chrysler Citaro

## b) Les projets de réseaux

- Le Projet **CUTE** (Clean Urban Transport for Europe), Europe



Il s'agit de tester à grande échelle, et en réel, la viabilité d'un transport urbain zéro pollution à l'aide de bus fonctionnant à l'hydrogène. 27 bus de ce type sont prévus pour entrer en service d'ici décembre 2004, et ce dans 9 villes d'Europe. Afin de tout tester, dans certaines villes, il est prévu que la production d'hydrogène se fasse sur place (donc par électrolyse), tandis que dans d'autres, le carburant sera livré aux lieux de ravitaillement des autobus (par pipe ou par camion). Lancé en novembre 2001, le projet doit durer 55 mois, et son budget est de 55 millions d'euros, l'Union Européenne finançant un tiers de ce montant global. Les bus sont des Daimler-Chrysler *Citaro*. Les villes concernées sont: Amsterdam, Barcelone, Hamburg, London, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm et Stuttgart.

L'objectif est de tester les équipements, bus et infrastructures dans des conditions de circulation, de typologie de terrain et de climat variées, ainsi que de percevoir la réaction du grand public.

Le projet CUTE fait partie du Fuel Cell Bus Club.

- Le projet **STEP** (Sustainable Transport Energy Project), Australie



SUSTAINABLE  
TRANSPORT  
ENERGY

Le projet STEP est l'équivalent australien du projet CUTE ; il se déroule à Perth.

Le projet STEP fait partie du Fuel Cell Bus Club.

- Le projet **ECTOS** (Ecological City TranspOrt System ), Islande

**ECTOS**

Le projet ECTOS est l'équivalent Islandais du projet CUTE ; il se déroule à Reykjavik.

Le projet ECTOS fait partie du Fuel Cell Bus Club.

A noter que l'Islande a une volonté affirmée du « tout-hydrogène », et s'est déjà lancée dans un programme de remplacement total des énergies fossiles par la technologie hydrogène, de l'électricité aux transports (terrestres et maritimes).

| Villes            | Partenaires                                                                                         | Production d'hydrogène                                            | Spécificités                                             |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Amsterdam</b>  | Hoek Loos, Milieudienst Amsterdam, GVB, Nuon, Shell Hydrogen                                        | Electrolyse à partir de sources renouvelables                     | Traffic urbain                                           |
| <b>Barcelone</b>  | TMB, BP                                                                                             | Electrolyse en partie de sources renouvelables (solaire)          | Climat chaud                                             |
| <b>Hambourg</b>   | HHa Hambourg, HEW, BP                                                                               | Electrolyse à partir de sources renouvelables                     | Pas de relief                                            |
| <b>Londres</b>    | London Buses, First, BP                                                                             | Reformage de combustibles fossiles                                | Traffic urbain dense, Climat modéré                      |
| <b>Luxembourg</b> | Air Liquide, Shell Hydrogen, Ministères de l'Economie et des Transports, FLEAA, AVI Luxembourg      | Importation d'H2 provenant du reformage de gaz naturel            | Traffic urbain                                           |
| <b>Madrid</b>     | Air Liquide, Gaz Natural, Repsol, EMT MadridBP                                                      | Reformage de fuel et de gaz naturel                               | Traffic urbain dense, Climat chaud                       |
| <b>Porto</b>      | BP, STCP Porto                                                                                      | Reformage de gaz naturel                                          | Typographie vallonnée et climat chaud                    |
| <b>Stockholm</b>  | SL, Busslink, Ville de Stockholm, Fortum                                                            | Electrolyse à partir de sources hydroélectriques                  | Conditions climatiques froides                           |
| <b>Stuttgart</b>  | SSB, BP, NWS, Ville de Stuttgart, Switch                                                            | Reformage de gaz naturel                                          | Typographie vallonnée                                    |
| <b>Perth</b>      | Government of Werstern Australia, Greehouse Office, Environment Australia, Path Transit, UNEP, STEP | Reformage de pétrole                                              | Climat chaud                                             |
| <b>Reykjavik</b>  | Shell Hydrogen B.V., Shell Iceland, Norsk Hydro ASA,...                                             | Electrolyse à partir de sources hydroélectriques et géothermiques | Aucune émission de CO2 et conditions climatiques froides |
| <b>(STEP)</b>     |                                                                                                     |                                                                   |                                                          |
| <b>(ECTOS)</b>    |                                                                                                     |                                                                   |                                                          |

Figure 20: Tableau comparatif des conditions d'exploitation des essais des projets CUTE, STEP et ECTOS

- Le programme japonais

Quatre exemplaires du Toyota FCHV-BUS2 circulent à Tokyo-Yokohama, dont deux sur une ligne régulière, depuis la fin 2002. En Août 2003, un 3<sup>ème</sup> bus a été livré au *Tokyo Metropolitan Government*. En 2005, on pourra retrouver à l'exposition à Aichi 8 bus d'une nouvelle version améliorée.

## c) Les déplacements

### (1) 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 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                           |
| <b>Lignes car jaune</b> | <b>2 000</b>                      | <b>autocar</b> | <b>4</b>                    | <b>4 000</b>                          | <b>autocar</b> | <b>8</b>                    |
| <b>TOTAL</b>            | <b>7 400</b>                      |                |                             | <b>17 400</b>                         |                |                             |

Figure 18: Récapitulatif des trafics actuels et prévisionnels des lignes connectées au pôle d'échange de Saint Paul (source: SR21)

Pour résumer, les prévisions envisagent 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.

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)    | Provenance | Fréquence | Intervalle en ms | BUS          |    | Capa. | longueur | Mini-BUS |    | Capa. | longueur | Total véhicules en attente en arrivée BUS | distance entre BUS (2) | longueur du quai en m | Remplissage des BUS ( hypothèse à confirmer ) | Nb Voyageurs HP |
|-----------------------------|-----------------|------------|-----------|------------------|--------------|----|-------|----------|----------|----|-------|----------|-------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------|
| PASTEL ( et Trois-Bassins ) |                 |            |           |                  |              |    |       |          |          |    |       |          |                                           |                        |                       |                                               |                 |
| 1                           | OUI             | RD 6       | 10        | 6                |              |    |       |          | 10       | 21 | 9     | 10       | 9                                         | 27                     | 50%                   | 105                                           |                 |
| 2                           | OUI             | RD 6       | 10        | 6                |              |    |       |          | 10       | 21 | 9     | 10       | 9                                         | 27                     | 50%                   | 105                                           |                 |
| 3                           | OUI             | RD 5       | 8         | 8                |              |    |       |          | 8        | 21 | 9     | 8        | 9                                         | 27                     | 50%                   | 84                                            |                 |
| 4                           | OUI             | RD 5       | 4         | 15               |              |    |       |          | 4        | 21 | 9     | 4        | 9                                         | 27                     | 50%                   | 42                                            |                 |
| 5                           |                 | C. VILLE   | 10        | 6                |              |    |       |          | 10       | 21 | 9     | 10       | 9                                         | 18                     | 50%                   | 105                                           |                 |
| 8                           | OUI             | RN1 Nord   | 8         | 8                | 8            | 57 | 12    |          |          |    |       | 8        | 12                                        | 36                     | 50%                   | 228                                           |                 |
| 9                           | OUI             | RD 6       | 10        | 6                | 10           | 57 | 12    |          |          |    |       | 10       | 12                                        | 36                     | 50%                   | 285                                           |                 |
| 63bis                       | OUI             |            | 4         | 15               | 4            | 57 | 12    |          |          |    |       | 4        | 12                                        | 36                     | 50%                   | 114                                           |                 |
| Nouv.                       |                 |            | 4         | 15               |              |    |       |          | 4        | 21 | 9     | 4        | 12                                        | 21                     | 50%                   | 42                                            |                 |
|                             |                 |            |           |                  | sous-total : |    | 22    |          | 46       |    |       | 68       | 255                                       |                        | 1 110                 |                                               |                 |
| CARS JAUNES                 |                 |            |           |                  |              |    |       |          |          |    |       |          |                                           |                        |                       |                                               |                 |
| A                           |                 | RAT-CMAY   | 1         | 60               | 1            | 57 | 12    |          |          |    |       | 1        | 12                                        | 24                     | 50%                   | 29                                            |                 |
| B                           | OUI             | RAT-CMAY   | 3         | 20               | 3            | 57 | 12    |          |          |    |       | 3        | 12                                        | 36                     | 50%                   | 86                                            |                 |
| C1                          |                 | RAT-CMAY   | 2         | 30               | 2            | 57 | 12    |          |          |    |       | 2        | 12                                        | 24                     | 50%                   | 57                                            |                 |
| C2                          | OUI             | RAT-CMAY   | 2         | 30               | 2            | 57 | 12    |          |          |    |       | 2        | 12                                        | 36                     | 50%                   | 57                                            |                 |
| 13                          | lignes au total |            |           |                  | 8            |    |       |          | -        |    |       | 8        | 120                                       |                        | 228                   |                                               |                 |
|                             |                 |            |           |                  | sous-total : |    | 30    | 46       |          |    |       | 76       | 375                                       |                        | 1 300                 |                                               |                 |
|                             |                 |            |           |                  | total :      |    |       |          |          |    |       |          |                                           |                        |                       |                                               | m               |

Nb moyen de voyageurs sur un intervalle de 5 mn : 108

Surface de stationnement + voie en m<sup>2</sup> : 3 000

soit en m<sup>2</sup> par ligne : 231

soit en m<sup>2</sup> par poste à quai : 130

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

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

Figure 19: Fonctionnement des lignes du réseau Pastel et Car Jaune sur le pôle d'échanges de St Paul  
(source: SYSTRA)

## (2) Rupture de charge

Lorsqu'un usager des transports en commun effectue un trajet entre deux points avec un changement de mode de transport (bus à bus, train à bus, etc), 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 entre les moyens de transports en commun, synchroniser les arrivées et départs des véhicules, et optimiser les trajets afin de desservir au mieux le plus de zones habitées possibles.

Simple en théorie, ces deux contraintes sont primordiales dans chaque projet mais complexes à entreprendre.

## (3) 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, 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. Coût des travaux : 625 000 000 €



Figure 20: Vue aérienne du tracé de la Route des Tamarins

**Une double vocation :**

- Offrir une 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 Denis.

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, etc.





**Figure 22: Projet de pont au dessus d'une ravine**

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.

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 ou 110km/h, selon les portions. Les vélos et les cyclomoteurs y seront interdits et il n'y aura aucun carrefour, feu tricolore 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 déplacements en 2015.

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.



**Figure 23: Tracé de la Route des Tamarins**

#### (4) Le TCSP Tram-train

L'objectif principal est la mise en place d'un système de Transports en Commun en Site Propre (TCSP) concourant à un objectif de rééquilibrage du territoire ; ainsi relier l'Ouest et l'Est par un système non soumis aux aléas de la circulation tout en conservant un service urbain. Un Tram-Train combine les avantages d'un transport en commun urbain et interurbain : il peut effectuer de nombreux arrêts en site urbain et bénéficie d'un plancher plat ; et peut atteindre une vitesse élevée en zone interurbaine.



Figure 24: Propositions de tracés du Tram-Train

Actuellement en phase d'étude de faisabilité, la mise en service est prévue à l'horizon 2012, et reliera les villes de Saint Benoît et Saint Paul.

Un des points particuliers du TCSP est la rupture de charge causée par le changement de moyen de transport à Saint Paul ; d'où l'idée de la création d'un pôle d'échange réunissant tous les moyens de transports (Tram-Train, bus, vélo, auto, piétons, etc.)

#### d) 1er dimensionnement

Le premier dimensionnement aboutit au choix d'une flotte de 3 bus express (Daimler-Chrysler *Citaro*), soit 50% de l'effectif de la flotte de la ligne express actuelle, pour des raisons de fiabilité et de progressivité de l'introduction de la technologie hydrogène dans les transports en commun vis-à-vis du public.

Chaque bus contient 44kg d'hydrogène en 9 bouteilles à 350 bars. Au total, les 3 bus effectueront 5 allers-retours par jour, soit 1000km, soit 220kg d'hydrogène à 350 bars à produire quotidiennement. La densité gazeuse de l'hydrogène à 273K est de 0.08988 kg/Nm<sup>3</sup> ; une masse de 220 kg d'hydrogène correspond donc à un volume de 2447.7 Nm<sup>3</sup>.

En prenant comme hypothèse une consommation électrique de 5kWh/Nm<sup>3</sup> (Considérant les caractéristiques d'un électrolyseur (HPE 65) de chez *Norsk Hydro Electrolysers*), la quantité électrique journalière à fournir pour une telle consommation d'hydrogène serait de 12.2MWh. La compression à 350 bars nécessite une consommation supplémentaire d'environ 10 % soit 14.5 MWh.

Les bus ne seront en service que les jours de la semaine, cela correspond donc à une production électrique annuelle de 3.8GWh, soit 57.2 tonnes d'hydrogène à produire annuellement.



Conséquences théoriques annuelles de la mise en place de 3 bus à hydrogène sur l'environnement :

| Gasoil     | CO2      | NOx    | CO     | HC      | Particules |
|------------|----------|--------|--------|---------|------------|
| -300 000 L | -1 300 t | -3.2 t | -1.3 t | -430 kg | -650 kg    |

[Calculé selon les normes **EURO 3, 2001**]

### e) Nuance autocar/autobus

Le tableau ci-dessous met en évidence l'inadéquation entre la demande pour le projet (vraisemblablement un autocar) et l'indisponibilité d'autocar à hydrogène, alors que l'autobus est déjà en essai depuis des années.



|                                    | <b>Autocar</b>                            | <b>Autobus</b>                                        |
|------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Réseau                             | Interurbain                               | Urbain                                                |
| Fréquences<br>Interdistances       | Faibles<br>Grandes (plusieurs kms)        | Élevées<br>400m en moyenne                            |
| Vmax (km/h) (+ 10t)                | 90-110                                    | 60-80                                                 |
| Encombrement                       | Grand                                     | Optimisé (hauteur)                                    |
| Soute à bagages                    | Oui                                       | Non                                                   |
| Position des passagers<br>Sécurité | Assis<br>Ceinture de sécurité obligatoire | Assis et debout<br>Barres, poignées, pas de ceintures |
| Plancher<br>Accès PMR              | Haut<br>Non                               | Bas<br>Possible                                       |
|                                    | A partir de 2005-2006                     | Depuis 1993                                           |

Figure 25: tableau récapitulatif des différences significatives pour La Réunion entre autocar et autobus; et disponibilité de ces véhicules en propulsion hydrogène

### f) Réseaux réunionnais

L'île présente la particularité d'être une région monodépartementale. 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.

**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

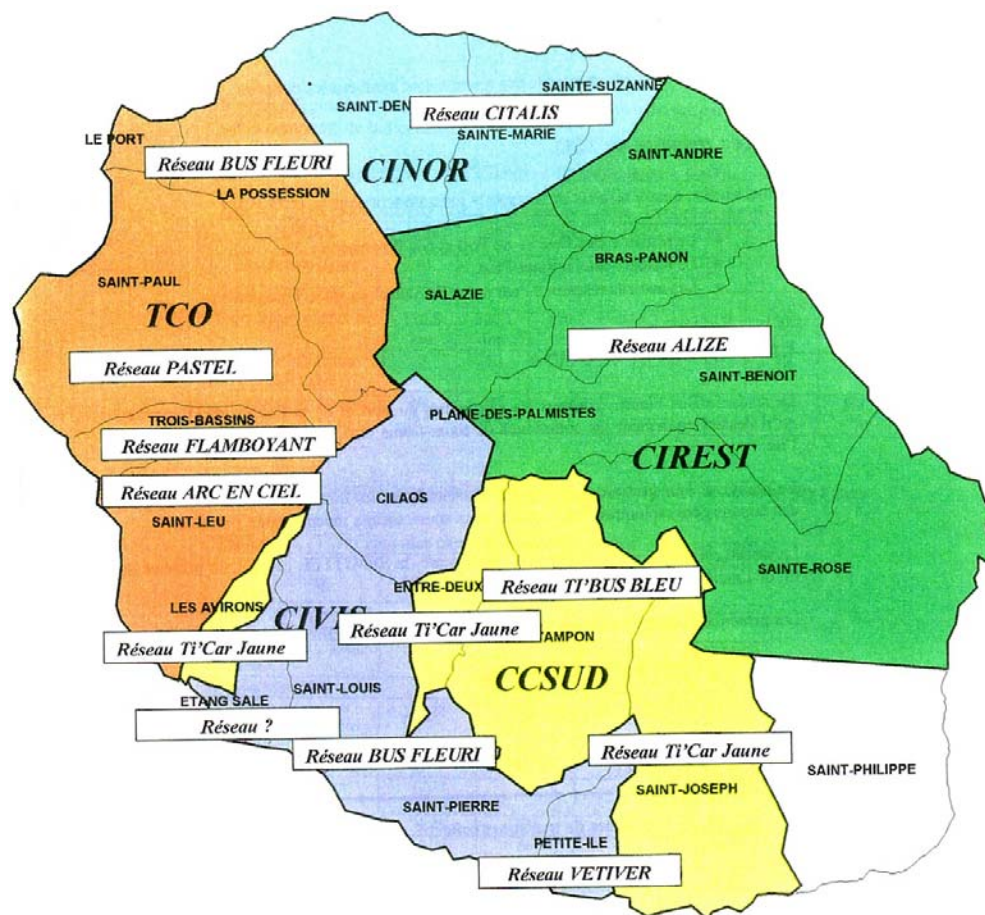


Figure 26: organisation des transports

### g) L'intégration des énergies renouvelables

Le calcul suivant permet de visualiser la taille du champ photovoltaïque qu'il faudrait mettre en place pour un réseau de 3 bus. Nous considérons notre installation dans la zone la plus ensoleillée de l'île, c'est à dire en zone 1 (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 suivante :

|                           |      |                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_c = E_j / (0.6 * E_i)$ | avec | $P_c = \text{puissance crête en Wc}$<br>$E_j = \text{énergie électrique à compenser par jour (Wh/jour)}$<br>$E_i = \text{énergie solaire incidente (kWh/m2/jour)}$ |
|---------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Nous trouvons donc une puissance de 4MWc (35 000m<sup>2</sup>) (4.5MWc avec la compression de l'hydrogène) à mettre en place pour couvrir de tels besoins. Cette solution n'est pas envisageable du fait de l'imposante surface au sol nécessaire pour l'alimentation de trois bus uniquement.

Le tableau et le synoptique ci-dessous résument les recherches et calculs effectués pour envisager la production d'hydrogène propre, soit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable :

| ANNUELLEMENT<br><br>(Ressources prévues en 2025, en complément du P.R.E.R.U.R.E) | Flotte de 3 Bus à hydrogène > 2012 | Tous les transports à la Réunion 2002 | Tous les transports à la Réunion 2025 |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Consommation équivalente                                                         | -                                  | 300 ktep                              | 690 ktep                              |
| Equivalence énergétique                                                          | -                                  | 105 000 t H2                          | 240 000 t H2                          |
| Consommation équivalente                                                         | 57.2 t H2                          | 63 000 tH2                            | 145 000 tH2                           |
| BESOIN - Eau pour électrolyse                                                    | 5 900 Hectolitres                  | 7 000 000 Hectolitres                 | 15 000 000 Hectolitres                |
| RESSOURCE – Eau                                                                  | >> 750 000 000 Hectolitres         |                                       |                                       |
| BESOIN – Electricité pour électrolyse + compression                              | 3.8 GWh                            | 4 500 GWh                             | 10 000 GWh                            |
| RESSOURCE – PV (Toiture 4- voies + stations + gare)                              | ? MWc                              | -                                     |                                       |
| RESSOURCE – PV (400 000 habitations avec 7m² de PV)                              | 400 MWc                            |                                       |                                       |
| RESSOURCE - PV (400 000 habitations avec 7m² de PV)                              | 6500 t H2                          |                                       |                                       |
| RESSOURCE – Energie des vagues                                                   | -                                  | 20 MW                                 |                                       |
| RESSOURCE – Energie des vagues                                                   | -                                  | 5000 t H2                             |                                       |
| RESSOURCE – Micro hydraulique (Réseau d’irrigation Bras de Cilaos)               | 5.6 tH2                            |                                       |                                       |
| RESSOURCE Micro hydraulique (Bassins de rétention 4-voies)                       | ?                                  |                                       |                                       |
| RESSOURCE – Eolien (vitesse de vent moyenne de 6m/s)                             | 100 MW                             |                                       |                                       |
| RESSOURCE – Eolien (vitesse de vent moyenne de 6m/s)                             | 2000 t H2                          |                                       |                                       |
| RESSOURCE – Géothermie                                                           | 100 MW                             |                                       |                                       |
| RESSOURCE – Géothermie                                                           | 12 000 t H2                        |                                       |                                       |
| RESSOURCES – Total ENR                                                           | 25 500 t H2                        |                                       |                                       |
| Proportion réalisable                                                            | 100 %                              | -                                     | 18 %                                  |

Figure 27: tableau récapitulatif des besoins et ressources pour la mise en place de 3 bus à hydrogène et pour le remplacement intégral des transports à l'horizon 2025

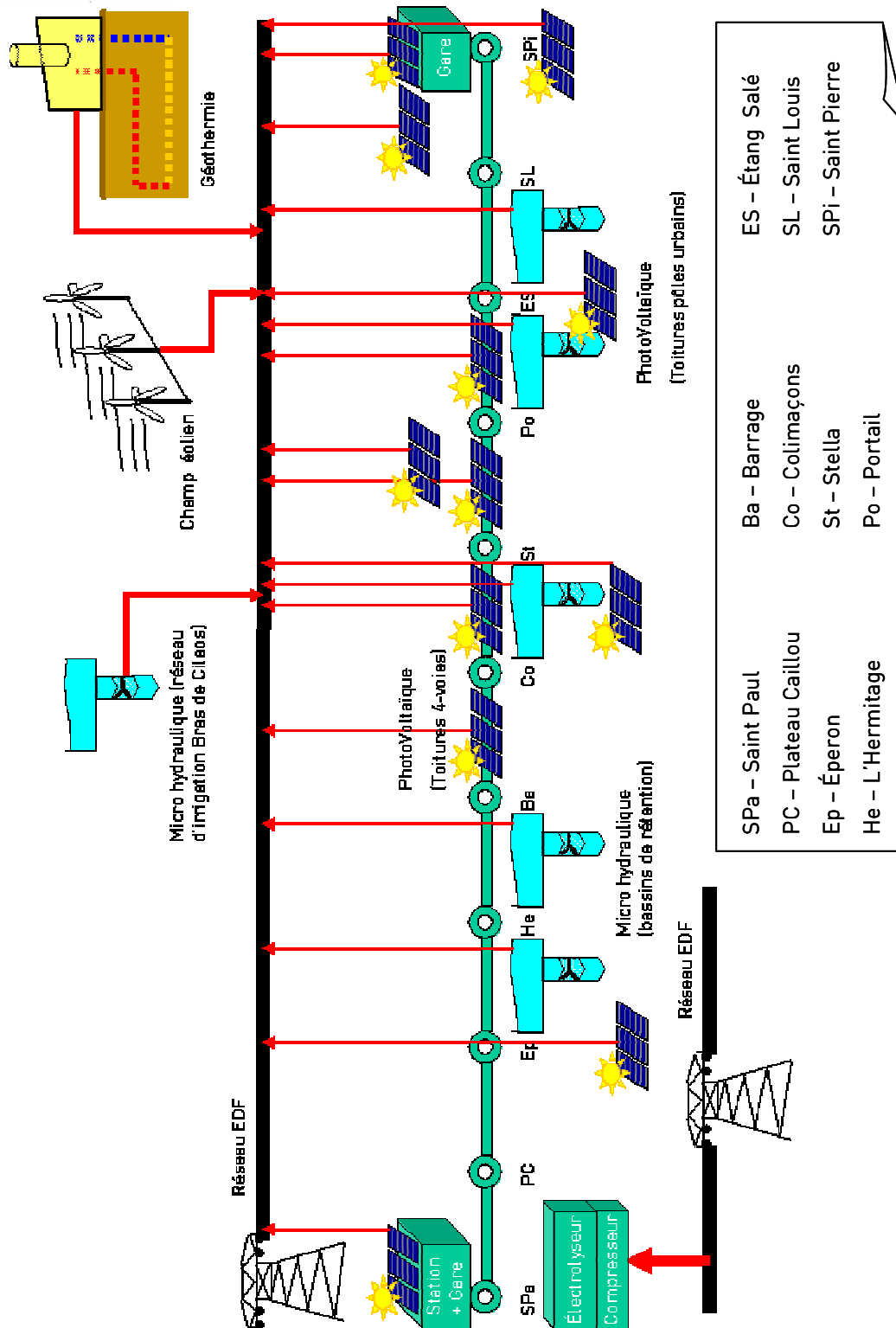


Figure 28 : synoptique des énergies sur le réseau de bus à hydrogène

L'étude a envisagé d'une part, le besoin d'électricité renouvelable pour le fonctionnement de 3 bus à hydrogène 5 jours par semaine, et d'autre part, dans le cadre du Business Plan (voir plus loin), le besoin pour le remplacement complet des transports à La Réunion à l'horizon 2025.

A propos des bus : un maximum d'aspects ont été chiffrés, cependant certaines ressources nécessiteraient à elles seules une étude complète. Ainsi ont été envisagés avec le maximum de précision les capacités de production d'électricité renouvelables, et leurs emplacements, notamment pour ce qui concerne la micro hydraulique greffée sur les bassins de rétention de la Route des Tamarins, et les installations Photovoltaïques en toiture des stations, des gares, des habitations des différents pôles urbains à proximité de la Route des Tamarins, et du recouvrement partiel de la 4-voie par des panneaux.

Comme prévu, un champ d'éoliennes, une usine de micro hydraulique et une usine de puissance à partir de la géothermie sont prévus, mais délocalisés (ex : au volcan pour la géothermie).

Toutes les productions électriques « énergies renouvelables » ont pour caractéristique intrinsèque d'offrir un réseau de production délocalisé, à l'opposition de la structure actuelle du réseau EDF (constitué de quelques centrales de forte puissance) ; ainsi le système le plus viable reste le suivant :

- injection des différentes productions électriques sur le réseau
- connexion au réseau de l'électrolyseur et du compresseur

En opposition à un système direct, impensable en raison des distances importantes entre les sources, qui impliquerait donc des infrastructures trop importantes et des pertes.

Malgré l'ambition de ce programme, on constate pourtant qu'il n'est pas en mesure de produire de l'électricité propre pour un remplacement total du parc des transports à l'horizon 2025.

### **C. L'ELABORATION DE PARTENARIATS TECHNIQUES ET FINANCIERS AFIN DE PERENNISER LE PROJET**

Bien que ces études soient de nature prospective, il est fondamental de commencer dès maintenant à essayer de mobiliser les différents acteurs concernés par un tel projet. De très nombreux contacts ont donc été lancés, dont certains ont donné lieu à des relations plus tissées, et permettent d'envisager des partenariats solides pour 2005-2006. Les contacts téléphoniques, par mail, par courrier, et les rendez-vous ont été très nombreux et je dresse ici une liste non exhaustive des structures avec lesquelles j'ai eu des relations :

**A La Réunion :** Le Conseil Régional ; le Conseil Général ; la Chambre des Métiers ; la DDE ; la SR21 (mandataire du projet Tram-train) ; le Centre Hospitalier de Bellepierre St Denis ; le Centre Hospitalier de St Pierre ; la SRPP (Société Réunionnaise des Produits Pétroliers, unique importateur) ; les sociétés de

transports Moutoussamy &Fils, Mooland Transports (GIE EVOTRANS) ; les SEM autorités locales et organisatrices des transports SOTRADER, SEMITTEL, SODIPARC ; la D6 (pôle d'intelligence économique) ; le Groupe Bourbon ; Sciences-Réunion ; le Parc National des Hauts ; l'Université de la Réunion, le TCO (Territoire de la Côte Ouest).

**En métropole :** Le Ministère des Transports et la DGTREN (Direction Générale des TRansports et de l'ENergie) ; RAEE (RhônAlpEnergie Environnement, Agence Régionale de l'Energie de Lyon) ; le Groupe TOTAL ; H2 Développement ; Moteur Nature.

**A l'international :** Le réseau ISLENET (European Islands Network on Energy & Environment, îles d'Europe) ; l'EUROPE ; les projets de bus à hydrogène CUTE (Europe), STEP (Australie), et ECTOS (Islande) ; le HCATT (Hawaii Center for Advanced Transportation Technologies) ; l'EHA (European Hydrogen Association).

Outre de nombreux dossiers de présentation et de partenariats, j'ai élaboré le premier planning prévisionnel (WorkPlan), et le premier Plan Financier du Groupe H2 (donc le projet de bus inclus) pour la première phase :

| <i>ANNEE</i> | <i>Dépenses</i>  |
|--------------|------------------|
| <i>2005</i>  | <i>65 000 €</i>  |
| <i>2006</i>  | <i>65 000 €</i>  |
| <i>2007</i>  | <i>65 000 €</i>  |
| <i>TOTAL</i> | <i>195 000 €</i> |

Figure 29: Plan Financier 2005-2007 - Groupe H2

| Mise à jour<br>26/07/2004 | <b>WORKPLAN RESEAU DE BUS A HYDROGENE</b>                                                    | 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 de transports en commun, Commande des bus à hydrogène          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| WP5                       | Coordination et lancement du réseau démonstratif                                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| WP6                       | Maintenance et suivi                                                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| WP7                       | Rapport d'étude                                                                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Figure 30: WorkPlan



#### **D. ROLE TRANSVERSE : LA COORDINATION DU GROUPE HYDROGENE**

En parallèle au rôle purement technique et à l'aspect « prospection partenariale » de mon projet de fin d'études, j'étais chargé de la coordination du groupe hydrogène, constitué de cinq stagiaires (dont moi). Le travail relatif à cette responsabilité a impliqué beaucoup d'investissement de ma part, en particulier les 3 premiers mois.

Mon premier souci, dans un souci de crédibilité du groupe hydrogène et de ses travaux, a été de mettre en place l'harmonisation de tous les documents produits. Ainsi les documents textes, les tableurs et les diaporamas se sont tous vus imposés une charte graphique. C'est également dans ce cadre qu'ont été créés les logos du « Groupe Hydrogène », et du sous-projet spécifique de bus à hydrogène :



**Figure 31: logo du Groupe Hydrogène**



**Figure 32: logo du projet de bus à hydrogène**

Pour la « coordination » au sens propre:

- J'ai créé un journal interne de coordination hebdomadaire intitulé « Lo Ban' Pionniers » (Le groupe des pionniers, en créole), regroupant les informations générales et importantes concernant le groupe et l'hydrogène, l'état d'avancement et les prévisions de travaux avec deadlines pour chacun des acteurs, et une rubrique axée sur l'état d'avancement et les prévisions de chacun sur son rôle transverse (coordination, base de données, Business Plan, etc.).
- J'ai établi un planning général des avancements de sujets de R&D Hydrogène, mis à jour régulièrement.
- J'ai préparé et conduit les réunions hebdomadaires.
- Je me suis chargé d'être le nœud de communication du projet, par lequel entrent et sortent les informations et les contacts.
- J'ai rationalisé les structures organisationnelles autour des projets. Exemple :

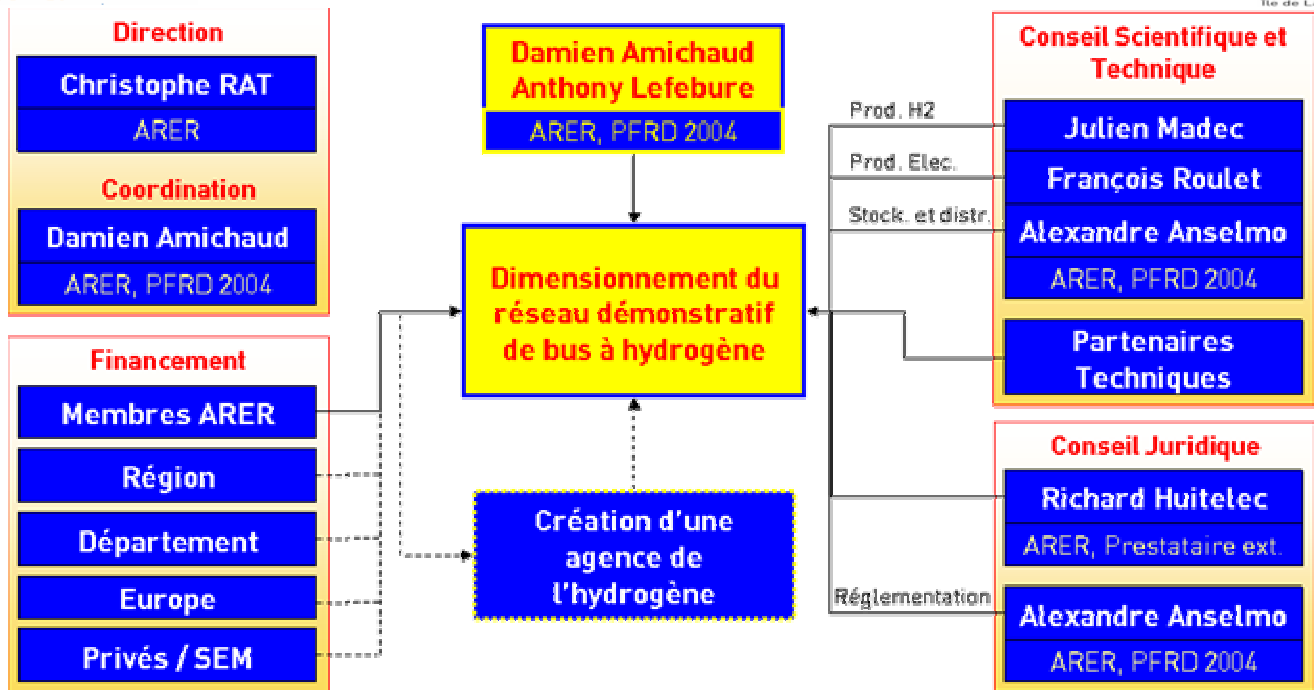


Figure 33 : structure organisationnelle du projet de bus

Nous avons organisé beaucoup de forums et de rencontres dédiés au sujet hydrogène, avec des objectifs soit de vulgarisation de la technologie, soit d'information, soit de débat technique. J'ai organisé certaines de ses rencontres et ait toujours été le protagoniste dans l'animation et la présentation de ces conférences.

*Exemple :*

-14 septembre 2005 : à l'occasion de l'Assemblée Générale des Ingénieurs Territoriaux de France, une demi-journée de formation a été consacrée au sujet hydrogène.

### **E. ROLE TRANSVERSE : ASSISTANCE DANS LE MONTAGE DU BUSINESS PLAN DE LA FILIERE HYDROGENE**

Le rôle transverse de Julien Madec était le montage d'un Business Plan (plan de développement de la filière hydrogène), à moyen et à long terme. Mon rôle de coordonnateur m'a donc impliqué dans cette tâche, notamment en tant que consultant. Mon rôle technique m'a impliqué sur toute la partie consacrée au développement de la filière hydrogène dans les transports à La Réunion. Extraits :

#### **QUELQUES CHIFFRES**

Aujourd'hui

- 700 ktep (source: INSEE-Réunion) de pétrole furent importées sur l'île en 2001
- 300 ktep (source: INSEE-Réunion) servent au secteur du transport routier (170 pour le gazole, 130 pour l'essence)

- Cela représente, en équivalence énergétique, 105 000 tonnes d'hydrogène à produire annuellement pour le secteur des transports
- Cependant, les moteurs thermiques utilisés aujourd'hui présente un rendement de 30%. La PAC appliquée au transport ayant un rendement de 50%, les besoins réels en hydrogène pour faire rouler le parc actuel (260000 voitures en 2001) sont de 63 000 tonnes par an

#### Prévisions à l'horizon 2025

- Le parc automobile est prévu à 500 000 voitures en 2020 (source: Observatoire des Transports et Déplacements) ce qui représente un taux d'accroissement de 3.5% par an
- En 2025, les besoins en hydrogène s'élèveraient donc à 145 000 tonnes par an

|                                     | 2001         | 2025         |
|-------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>Quantité d'hydrogène (tonne)</b> | 63 000       | 145 000      |
| <b>Besoins en eau (litre)</b>       | 700 millions | 1.5 milliard |
| <b>Besoins électrique (TWh)</b>     | 4.5          | 10           |

#### DE PLUS

- 400 MWc de solaire peuvent produire 6 500 tonnes d'H2 par an
- 100 MW d'éolien (avec une vitesse de vent moyenne de 6m/s) peuvent produire 2 000 tonnes d'H2 par an
- 100 MW de géothermie peuvent produire 12 000 tonnes d'H2 par an

#### TRANSPORTS ET LIMITES

Bien que de nouvelles puissances importantes d'énergies renouvelables peuvent être installées sur l'île à l'avenir (énergie des vagues, géothermie), il apparaît, qu'au niveau technologique actuel, le remplacement du pétrole par l'hydrogène pour le transport ne soit pas réalisable à la Réunion en raison de la taille importante du parc automobile.

Cependant, dans le cadre d'un développement du « Transport en Commun en Site Propre » (TCSP), il serait envisageable, en terme de technologie de bus et de production d'hydrogène, de changer l'ensemble du parc des bus de l'île en bus à hydrogène

#### INFRASTRUCTURES NECESSAIRES

##### **Pour les besoins électriques liés à la production:**

- Mise en place de panneaux photovoltaïques en toiture
- Parcs éoliens de grande puissance
- Centrale à énergies des vagues
- Centrale géothermique

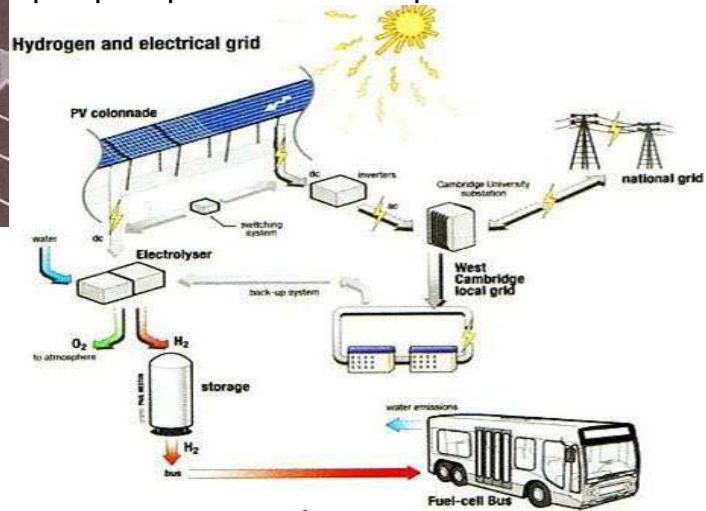
##### **Pour l'hydrogène:**

- Centrale d'hydrogène (production, stockage)
- Réseau de stations de remplissage (distribution)
- Parc de bus intégrant la « technologie hydrogène » (utilisation)



Electrolyseur  
Pompe H<sub>2</sub>  
Réservoir de stockage  
Compresseur

Infrastructures nécessaires au développement de l'hydrogène propre pour le Transport:



### **F. LE DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE FILIERE**

« Tout de qui est inconnu fait peur », telle était la phrase qui concluait chacune de mes conférences, afin d'expliquer l'appréhension ressentie par les acteurs avec qui nous avons travaillé. Ainsi avons-nous été confrontés au dur problème de faire accepter un changement radical d'un mode de pensée fondamentalement basé sur l'énergie fossile, que ce soit dans le domaine de l'électricité ou du transport. Plusieurs partenaires s'étaient montrés vivement intéressés par l'étude, et se sont désistés au dernier moment. Il est clair que faire accepter ce genre de projet est très difficile, et le faire à la Réunion l'est encore plus, pour des raisons de faible démontrabilité, de faible poids dans l'économie européenne, et d'éloignement (vis-à-vis des constructeurs, pour la surveillance des installations).

## VIII. CONCLUSION

Ce Projet de Fin d'Etudes à l'ARER, concernant l'hydrogène dans les transports, m'a permis d'acquérir beaucoup de connaissances sur l'hydrogène dans les transports, ainsi qu'une vision globale de la problématique entourant cette technologie et du switch technologique qui va peut-être s'opérer dans les prochaines décennies. J'ai ainsi gagné en ouverture d'esprit, tant au niveau de ma perception des modes de propulsion terrestres, que des perspectives d'évolution de ce secteur soumis à un fort lobbying général. De plus, j'ai découvert la façon de travailler dans la Recherche & Développement, et ait accentué mon adaptabilité vis-à-vis d'un milieu de travail inconnu, à savoir la R&D, dans le cadre d'une association, et dans un milieu humain très hétérogène.

Au-delà des acquis purement techniques, l'expérience humaine retirée de ce stage est importante, notamment grâce au rôle de coordination qui m'a été confié. Ce dernier m'a même permis de rentrer en relation avec beaucoup de décideurs politiques et industriels de l'île de la Réunion. D'autre part, j'ai pu constater la nature et l'ampleur des difficultés de la mise en route d'un projet, a fortiori quand son aspect fortement novateur remet en cause beaucoup de certitudes et demande de la part des acteurs potentiels un effort important, voire une prise de risque.

Pour conclure, j'estime que la somme de mes petites expériences professionnelles me permettent désormais de rentrer dans le monde professionnel sans appréhension aucune.

## IX. BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

| Ouvrages littéraires                                                   |                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuel Cell Technology Handbook, G. Hoogers                              |                                                                                                                                                                               |
| TER, Tableau Economique de La Réunion, édition 2003                    |                                                                                                                                                                               |
| Clefs CEA N°44, Nouvelles Technologies de l'énergie                    |                                                                                                                                                                               |
| Hydrogen Economy, J RiFkin                                             |                                                                                                                                                                               |
| Fuel Cell Systems explained, J. Larminie A Dicks                       |                                                                                                                                                                               |
| Vidéo                                                                  |                                                                                                                                                                               |
| Document video DVD Hawaii Hydrogen                                     |                                                                                                                                                                               |
| Sites Web                                                              |                                                                                                                                                                               |
| Conseil Régional de la Réunion                                         | <a href="http://www.region-reunion.com">www.region-reunion.com</a>                                                                                                            |
| Conseil Général du 974                                                 | <a href="http://www.cg974.fr">www.cg974.fr</a>                                                                                                                                |
| DDE                                                                    | <a href="http://www.reunion.equipement.gouv.fr">www.reunion.equipement.gouv.fr</a>                                                                                            |
| Réseau ISLENET                                                         | <a href="http://www.islenet.net">www.islenet.net</a>                                                                                                                          |
| INSEE Réunion                                                          | <a href="http://www.insee.fr/fr/insee_regions/reunion">www.insee.fr/fr/insee_regions/reunion</a>                                                                              |
| AGence pour l'Observation de la Réunion, l'Aménagement et l'Habitat    | <a href="http://www.agorah.com">www.agorah.com</a>                                                                                                                            |
| Clean@uto                                                              | <a href="http://www.cleanauto.com">www.cleanauto.com</a>                                                                                                                      |
| Moteur Nature                                                          | <a href="http://www.moteurnature.co">www.moteurnature.co</a>                                                                                                                  |
| Asociación Española del hidrógeno                                      | <a href="http://aeh2.org">http://aeh2.org</a>                                                                                                                                 |
| BMW Clean Energy                                                       | <a href="http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/index.html">http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/index.html</a> |
| California Hydrogen Highway                                            | <a href="http://hydrogenhighway.ca.gov">http://hydrogenhighway.ca.gov</a>                                                                                                     |
| Australian department for planning and infrastructure : sustainability | <a href="http://www.dpi.wa.gov.au/sustain/conference04.html">http://www.dpi.wa.gov.au/sustain/conference04.html</a>                                                           |
| UTC Fuel Cells                                                         | <a href="http://www.utcfuelcells.com">www.utcfuelcells.com</a>                                                                                                                |
| ARER                                                                   | <a href="http://www.arer.org">www.arer.org</a>                                                                                                                                |
| Associations Française et Européennes de l'Hydrogène                   | <a href="http://www.afh2.org">www.afh2.org</a><br><a href="http://www.h2euro.org">www.h2euro.org</a>                                                                          |
| Ballard                                                                | <a href="http://www.ballard.com">www.ballard.com</a>                                                                                                                          |
| CEA                                                                    | <a href="http://www.cea.fr">www.cea.fr</a>                                                                                                                                    |
| Réseau Pile à Combustible                                              | <a href="http://www.veille.reseaupaco.org">www.veille.reseaupaco.org</a>                                                                                                      |
| Stuart Energy                                                          | <a href="http://www.stuartenergy.com">www.stuartenergy.com</a>                                                                                                                |
| Fuel Cell Bus Club (CUTE, ECTOS, STEP)                                 | <a href="http://www.fuel-cell-bus-club.com">www.fuel-cell-bus-club.com</a>                                                                                                    |
| Hawaii H2 publications                                                 | <a href="http://www.state.hi.us/dbedt/ert/pubs.html">http://www.state.hi.us/dbedt/ert/pubs.html</a>                                                                           |
| Hawaii High Technology Development Corporation                         | <a href="http://www.htdc.org">www.htdc.org</a>                                                                                                                                |
| New Energy, Islande                                                    | <a href="http://www.newenergy.is">www.newenergy.is</a>                                                                                                                        |
| Shell hydrogen website                                                 | <a href="http://www.shell.com/home/Framework?siteId=hydrogen-en">http://www.shell.com/home/Framework?siteId=hydrogen-en</a>                                                   |