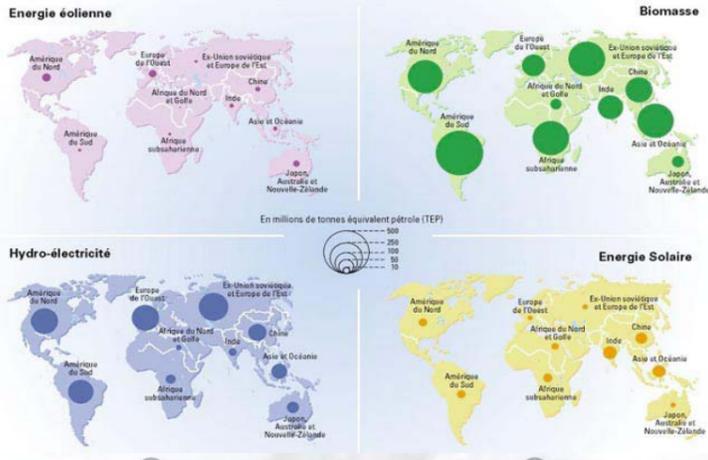
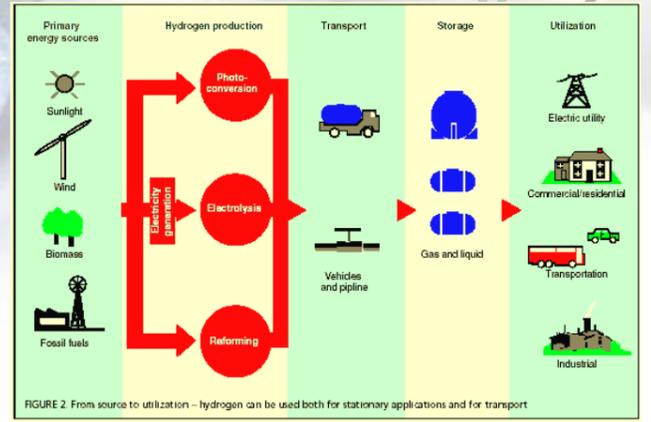


Pourquoi l'Hydrogène : Notion de vecteur énergétique

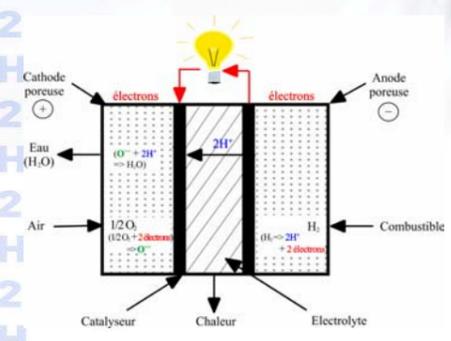


Tout comme l'électricité l'hydrogène est un vecteur énergétique, il n'existe pas de puits d'hydrogène. Il doit être produit à partir de ressources primaires : nucléaire, fossiles...ou renouvelables. Un cycle énergétique ayant des ressources renouvelables et l'hydrogène comme vecteur aura une faible consommation d'énergie grise et émission de polluants

- Plusieurs arguments se dégagent en faveur de l'utilisation de l'hydrogène pour une économie hydrogène :
- Localisation et fin des ressources fossiles
 - Accroissement de la demande en énergie avec l'augmentation de la population mondiale
 - Accroissement des tensions politiques autour des gisements d'énergies fossiles
 - Coût de l'énergie fossile incontrôlable
 - Lutte contre l'effet de serre
 - Lutte contre le « smog » des concentrations urbaines
 - Lutte contre les nuisances sonores
- La solution :** Utilisation des énergies renouvelables disponibles dans le monde entier avec l'hydrogène comme vecteur

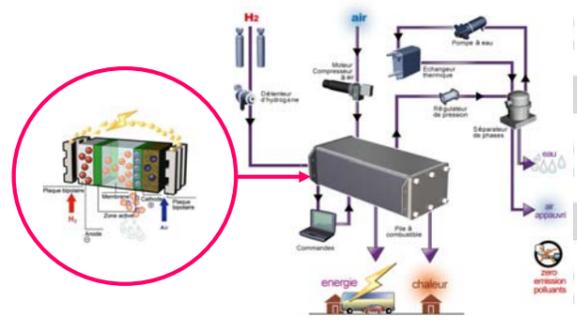


Le principe de la pile à combustible

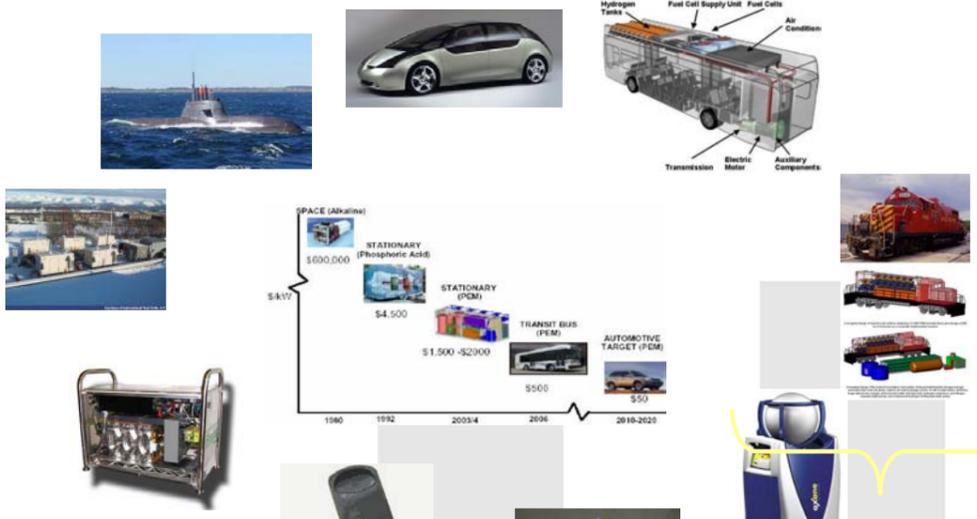


- Avantages**
- des rendements énergétiques élevés même à charge partielle: de 40 à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur),
 - de faibles émissions sonores,
 - peu d'émissions (en particulier en termes de CO, NOx, CnHm et particules, mais elles dépendent du combustible utilisé et du type d'application),
 - elles sont de construction modulaire,
 - diverses températures de fonctionnement: cela permet d'utiliser la chaleur en couplant avec une turbine ou pour des applications allant de l'eau chaude à la vapeur,
 - pas de parties rotatives.
- Inconvénients**
- le coût: Le prix des piles est bien supérieur à celui assurant la compétitivité. Les points clés sont le catalyseur (Platine), membranes, plaques bipolaires, périphérie...
 - le poids et le volume: surtout si on veut l'intégrer dans un véhicule,
 - la durée de vie: elles doivent durer plus de 40000h dans les applications stationnaires,
 - l'intégration thermique: entre valoriser la chaleur ou l'évacuer selon la pile et l'application,
 - le carburant: Idéalement, le meilleur carburant est l'hydrogène, mais comme aucune infrastructure adéquate (production, transport, distribution et stockage) n'existe actuellement, on pense à d'autres carburants pour obtenir ensuite l'hydrogène par reformage.

Système pile à combustible avec organes

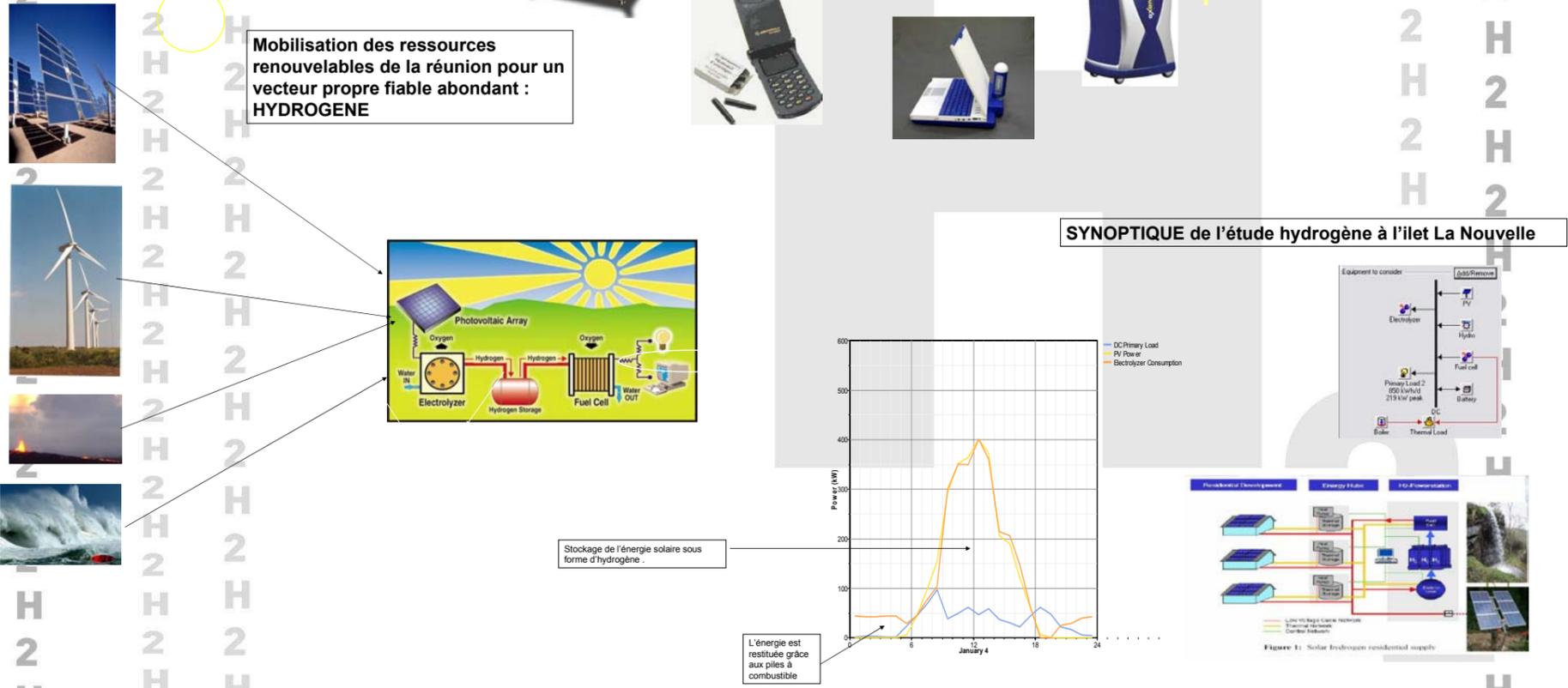


Les applications: Elles sont diverses et variées, l'hydrogène peut fournir de l'énergie à plusieurs types de systèmes avec des contraintes bien différentes



Mobilisation des ressources renouvelables de la réunion pour un vecteur propre fiable abondant : HYDROGENE

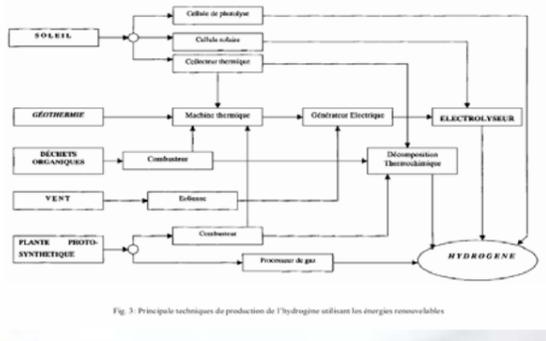
SYNOPTIQUE de l'étude hydrogène à l'ilet La Nouvelle



Production propre d'hydrogène et d'oxygène à partir de l'eau et des énergies renouvelables à la Réunion



Les différentes techniques de production d'hydrogène utilisant les EnR



L'hydrogène peut être produit à partir de différents process utilisant les EnR:

- la photolyse qui produit de l'hydrogène à partir de la photosynthèse sur des micro-algues ou des bactéries
- le reformage des gaz de synthèse issus de la décomposition naturelle de la biomasse
- la décomposition thermochimique de l'eau
- l'électrolyse de l'eau

Le procédé de reformage consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H₂, CO, CO₂, CH₄ et H₂O) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. Cette réaction peut être suivie par différentes opérations qui conduisent à la production d'hydrogène.

A partir d'une ressource fossile, ce procédé représente 95% de la production mondiale. Néanmoins, il peut être utilisé avec des gaz issus de déchets végétaux. Le bilan d'émission de CO₂ est ainsi nul du fait de l'absorption du gaz lors de la croissance des plantes.

Réaction 1 : CH₄ + H₂O → CO + 3H₂ (1) ΔH = 206 kJ mol⁻¹
 Réaction 2 : CO + H₂O → CO₂ + H₂ (2) ΔH = -41 kJ mol⁻¹
 Bilan des deux réactions : CH₄ + 2H₂O → CO₂ + 4H₂ (3) ΔH = 165 kJ mol⁻¹

L'électrolyse de l'eau

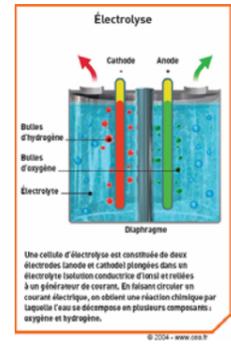
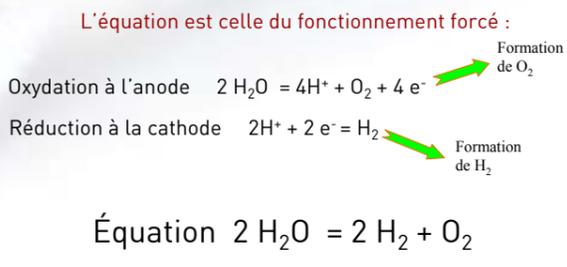
Généralités:

- Représente aujourd'hui moins de 1% de la capacité totale de production de l'hydrogène
- N'est utilisée que si l'électricité est bon marché (Islande)
- Ou si une pureté élevée de l'hydrogène produit est requise

Fonctionnement:

- Procédé de production d'hydrogène à partir d'eau
- Une molécule d'eau est composée de 2 atomes d'hydrogène et 1 atome d'oxygène
- Sous l'effet d'un courant électrique, les 2 gaz se séparent et migrent vers l'électrode positive (anode) pour l'oxygène et vers l'électrode négative (cathode) pour l'hydrogène

La réaction:



La quantité de H₂ formé est deux fois plus grande que celle de O₂

Le volume de H₂ formé est donc deux fois plus grand que celui de O₂

Besoins:

- Nécessite un apport d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction.
- Potentiel théorique de la décomposition = 1.481 V à 298 K.
- Les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1.7 à 2.1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85 %.
- La consommation électrique des électrolyseurs industriels est de 4 à 6 kWh/Nm³
- 1 kWh consommé servira à produire 168l d'hydrogène (rendement=50%)
- L'alimentation en eau d'un électrolyseur est de 1L/Nm³
- L'eau introduite doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'équipement et s'accumulent au fil de l'électrolyse

La production d'hydrogène et de l'oxygène à la Réunion

Potentiel EnR selon le PRERURE

- L'hydraulique: 170 MW installés à l'horizon 2025
- Le solaire photovoltaïque: 100 MW installés à l'horizon 2025
- L'éolien: 100 MW installés à l'horizon 2025
- Biomasse et bagasse: 200 MW à l'horizon 2025
- Géothermie: 20 à 100 MW installés à l'horizon 2025
- Energie des vagues: 20 à 30 MW installés à l'horizon 2025

Production d'H₂ à partir d'EnR

Ratios de production:

- > 400 Mwc de solaire → 6 500 tonnes d'H₂/an
- > 100 MW d'éolien (vent moyen de 6m/s) → 2000 tonnes d'H₂ par an
- > 100 MW de géothermie → 12 000 tonnes d'H₂/an



L'électrolyseur

Les modules comprennent généralement:

- Une alimentation électrique
- Les cellules d'électrolyse (solution de potasse, assemblage mono ou bipolaire)
- Une unité de purification de l'eau
- Une unité de purification de l'hydrogène
- Un compresseur
- Une unité de contrôle

Technologie utilisée	Vandenborre IMET 300	Vandenborre IMET 1000 Series
Production d'Hydrogène		
Hydrogène en sortie	Nm ³ /h 1 à 3	4 à 15 15 à 30 31 à 45 46 à 60
Nombre d'électrolyseurs	1	1 2 3 4
Pression en sortie	bar 25	10 ou 25
Surface occupée	cm ² 300	1000
Pureté standard	% 99.9	99.9
Consommation kWh/Nm ³	4.9	4.8
Puissance	300 à 600 Vdc / 50 Hz triphasé	60 kW à 300 kW
Production d'Oxygène		
Oxygène en sortie	Nm ³ /h 0.5 à 1.5	0 à 1.5 1.5 à 2.25 2.3 à 3.0
Pureté standard	% 99.5	99.5
Consommation d'eau	Environ 1 litre d'eau par Nm ³ d'hydrogène produit	



L'eau

- Immense ressource en eau salée
- Réseau hydrographique important comprenant 750 ravines et rivières
- Région particulièrement arrosée mais avec dissymétrie Est/Ouest
- 240 millions de m³ d'eau sont prélevés chaque année en rivières et nappes pour l'alimentation en eau potable
- Besoin annuel en eau de 2 millions de m³ pour une substitution du pétrole par l'hydrogène dans le transport réunionnais. Soit à peine 1% de la consommation réunionnaise en eau potable

Le cycle vertueux de l'eau

Quelques applications étudiées

« Application de la pile à combustible dans la casa DD »

Caractéristiques techniques

Consommation électrique	10 kWh/jour
Ensoleillement	5 kWh/m ² /jour
Puissance PV	5 kWc
PV brut (sortie champ)	20 kWh/jour
PV net (sortie transfo) vers électrolyseur	14.5 kWh/jour
vers réseau	4 kWh/jour
total	18.5 kWh/jour
Hydrogène brut	3.6 Nm ³ /jour
Hydrogène net	3.3 Nm ³ /jour
Puissance PAC	5 kW
Encombrement	1 m ³
Production PAC (elec)	1.5 kWh/Nm ³
Stockage pour 1 semaine d'autonomie électrique	45 Nm ³ (125 litres à 350 bars)
Consommation d'eau	12 litres/jour

« ERD de l'île de La Nouvelle »

Consommation électrique	310 MWh/an
Micro-hydraulique	150 MWh/an
Ensoleillement	4.63 kWh/m ² /jour
Puissance du champ PV	300 kW (toits+ferme)
PV brut (sortie champ)	500 MWh/an
PV net (sortie transfo) vers électrolyseur	315 MWh/an
vers batteries/réseau	185 MWh/an
total	480 MWh/an
Hydrogène brut	75 000 Nm ³ /an
Hydrogène net	70 000 Nm ³ /an
Production PAC (100 kW)	100 MWh/an
Consommation d'eau	280 000 litres/an

« Site démonstratif des EnR à IUT de St Pierre »

Eolien 15 kW donnée Météo France avec un vent de 6 m/s (moy) avec un vent de 10 m/s (moy)	45 kWh/jour 80 kWh/jour 200 kWh/jour
Ensoleillement	5 kWh/m ² /jour
Puissance du champ PV	20 kW
PV brut (sortie champ)	100 kWh/jour
PV net (sortie transfo) vers électrolyseur	70 kWh/jour
vers réseau	25 kWh/jour
Hydrogène brut	30 à 65 Nm ³ /jour
Hydrogène net	27.5 à 60 Nm ³ /jour
Production max de la PAC	90 kWh/jour
Consommation d'eau	120 à 260 litres/jour

Hydrogène, vecteur énergétique d'hier et d'aujourd'hui



L'hydrogène a souvent eu mauvaise image:
explosion du dirigeable Allemand l'Hindenburg en 1937.
Or on sait que cette accident n'était pas du à l'H₂, mais à la nature extrêmement inflammable du vernis posé sur l'enveloppe.



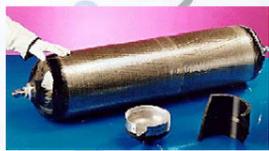
Le gaz de ville, distribué après la dernière guerre, était constitué à 50% d'hydrogène
Kiel en Allemagne était alimenté encore il y a peu par un mélange contenant 65% d'H₂.
Si ce mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone a été délaissé, c'est en raison de l'extrême toxicité de l'oxyde de carbone et non à cause de l'hydrogène.



Gaz de houille:
-H₂: 48% -CO: 8%
-CH₄: 36% -CO₂: 5%

2 solutions technologiques:

- ✓Vessie aluminium + bobinage composite (A)
- ✓Materiu thermo-plastique + bobinage composite (B)



Réservoir (vessie aluminium + composite) thermoplastique pour permettant de stocker de l'hydrogène gazeux à 700 bars (A) réservoir haute pression (B)

Evolutions des procédés de stockage:



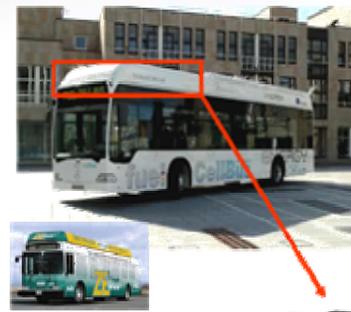
Evolution des bouteilles d'H₂ en 10 ans



Hydrures: stockage de l'H₂ à basse pression
Capacité massique: 8%



En 1991, la découverte des nanotubes de carbone a ouvert de nouvelles perspectives pour le stockage basse pression

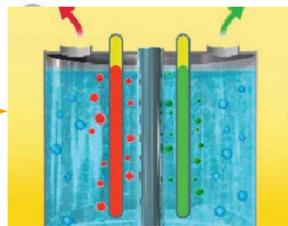


44 kg d'H₂ répartis dans 9 réservoirs à 250 b.

- Solaire
- Hydraulique
- Géothermique
- Eolien



Biomasse



Transformation thermochimique & Gazéification de la biomasse

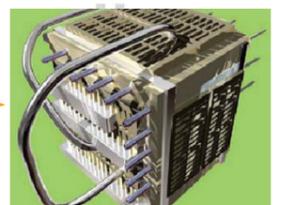


Réseau de distribution



Stockage:

- Sous forme liquide (à -253 °C)
- Sous haute pression (700 b.)
- Sous basse pression (hydrures)



Applications PAC:

- Portables (ordinateurs, GSM...)
- Embarquées (transport)
- Stationnaires (production domestique d'électricité)

L'hydrogène en toute sécurité

Sécurisation:

- ✓Analyse de fiabilité – Simulation numérique
- ✓Etude de fragilisation
- ✓Test de chute
- ✓Test d'éclatement: résistance > 1700 bar
- ✓Test de perforation: tir à balles réelles
- ✓Crash Test



En Europe de l'ouest, un réseau de plus de 1000 Km de pipeline est exploité par Air Liquide

65 milliards de m³ produits en Europe
550 milliards dans le monde



station de ravitaillement en hydrogène liquide - Aéroport de Munich



Au total, on compte une trentaine de stations hydrogène dans le monde, principalement en Allemagne, Japon et aux Etats-Unis



⇒ Témoigne de la maîtrise et de la fiabilité de ce vecteur



Test de chute à 14 m



Impact à 65km/h d'un véhicule sur réservoir



Réservoir composite de 9 dm³ équipé d'un thermo-fusible et d'un limiteur de débit



Essai de tir à la balle

INERIS

Impact de tir sur réservoir à 700 b d'H₂:

⇒ pas d'éclatement



Stockage d'H₂ liquide de la NASA à -253°C



TRANSITION PETROLE/HYDROGENE DANS LES TRANSPORTS



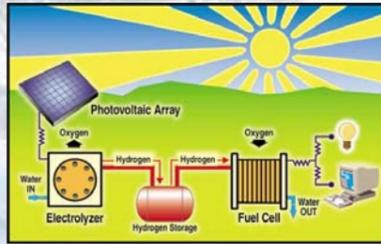
Pourquoi l'hydrogène et comment ?

Selon les prévisions, les stocks de pétrole sont vides dans 40-50 ans

La hausse des prix du carburant et la dégradation de l'environnement vont s'accroître si l'économie reste basée sur l'or noir

Solution inévitable: Hydrogène ou H₂

L'atome H est le plus abondant dans l'univers donc c'est une source inépuisable d'énergie



La Pile à Combustible transforme de l'hydrogène (H₂) et de l'oxygène (O₂) en eau, électricité et chaleur

On peut utiliser ce moteur pour des applications stationnaires (+cogénération) ou instationnaires (+moteur électrique)

Rendement: Moteur diesel max 30%
PAC max 50%

Evolution de la technologie



Electrovan, 5kW

1967

1992



ZEV, Zero Emission Vehicle, 50kW



NEBus, New Electric Bus, 250kW

1997

2002

FCHV-BusX, Toyota, 2x90kW



Cette liste est loin d'être exhaustive!

Projets de réseaux d'autobus à Pile à Combustible 2002-2006

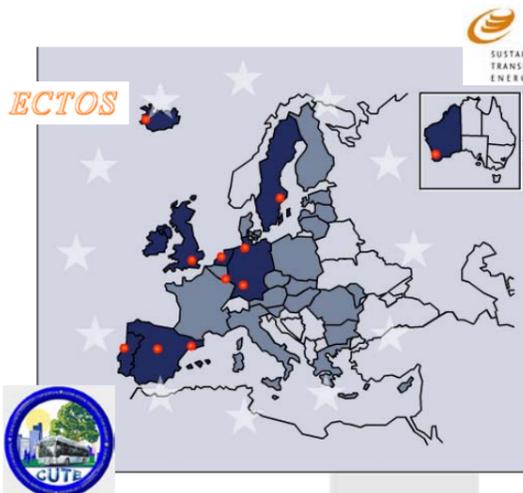
Autobus CITARO

1 million d'euros



Masse à vide/maximale 14,2t/19t
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)

25kg d'H₂ sous pression par plein



Programme Européen CUTE : Clean Urban Transport for Europe
9 villes d'Europe confrontent la même technologie sous diverses contraintes

Programme Islandais ECTOS : Ecological City Transport System
L'Islande est particulière puisqu'elle souhaite changer d'énergie primaire: elle veut baser son économie sur l'hydrogène et non plus le pétrole

Programme Australien STEP : Sustainable Transport Energy Project
La ville de Perth marque son intérêt pour le développement durable



Le remplissage des bus se fait naturellement dans des stations-services hydrogène

Flotte démonstrative à la Réunion

Les conditions de trafic vont s'améliorer après la mise en service de la Route des Tamarins

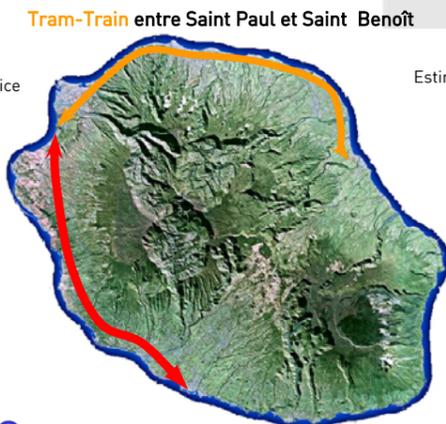
Si le Tram-Train est construit, le taux de déplacement des réunionnais va encore augmenter fortement

Une ligne d'autocars hydrogène pourrait desservir la liaison St Pierre/St Paul/St Denis

Production propre d'hydrogène



Fort potentiel énergies renouvelables à La Réunion



Route des Tamarins entre Saint Paul et Saint Pierre

Estimation de la situation en 2015: 20 aller-retour journaliers sur la liaison Saint Pierre / Saint Paul

Ligne de cars traditionnels:

300 000 litres de pétrole importés par an

1 300 tonnes de CO₂

3,2 tonnes de Nox (Oxydes d'azote)
1,3 tonnes de CO (Monoxyde de carbone)

Ligne de cars hydrogène:

80 tonnes d'H₂ par an à produire sur l'île à l'aide d'électricité d'origine renouvelable

Respecte l'engagement du protocole de **Kyoto** (Europe) et du **PRERURE** (Région)

Etre les *premiers à faire le pas* vers la transition et *prendre de l'avance technologique*



PARTENAIRES PLATE-FORME RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT



Etudiant à l'Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile
Dominante Ferroviaire & Filière Fluide et Energétique

Anthony LEFEBURE





TRANSITION PETROLE/HYDROGENE DANS LES TRANSPORTS

- Flotte démonstrative de bus à hydrogène -

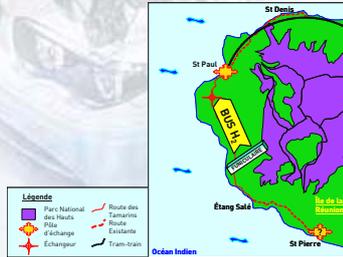


Les conditions d'implantation d'une première flotte démonstrative de bus à hydrogène sur la Route des Tamarins de St Denis à St Pierre via St Paul

L'étude

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
- En conséquence, aborder les thèmes d'études du dimensionnement technique du premier réseau démonstratif de bus à hydrogène sur l'île de La Réunion:
 - o Le réseau
 - o La production propre
 - o « Station service Hydrogène » : distribution et stockage



Structures existantes et futures

- Une 4 voies (2x2 voies) relie St Pierre à Etang Salé, et une 4 voies relie 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 envisagé 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 entre les différents modes de transports

Une filière optimisée du puits à la roue pour être propre et sans rejets nocifs ou polluants

Une filière 100% propre

La production d'hydrogène est assurée par un électrolyseur dont la source électrique sont les ENR Réunionnaises

La production d'énergie à bord du véhicule se fait via une PAC (Pile A Combustible)

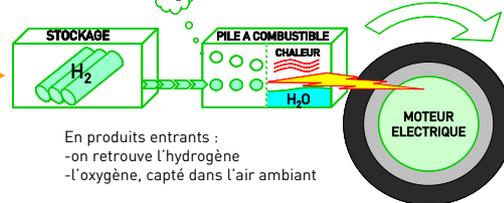
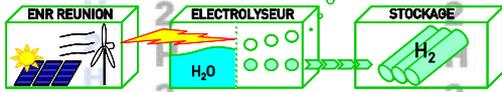
La production de la PAC est :

Une filière propre: production d'hydrogène

On obtient deux produits :
- de l'oxygène gazeux, rejeté dans l'air
- d'hydrogène gazeux à 1 bar, qui est compressé à une pression de 350 bars, puis stocké en bouteilles

Une filière propre: utilisation avec la PAC

- de la chaleur, réutilisée dans certains systèmes
- de l'électricité, qui alimente un moteur électrique
- de l'eau sous forme gazeuse rejetée par un pot d'échappement

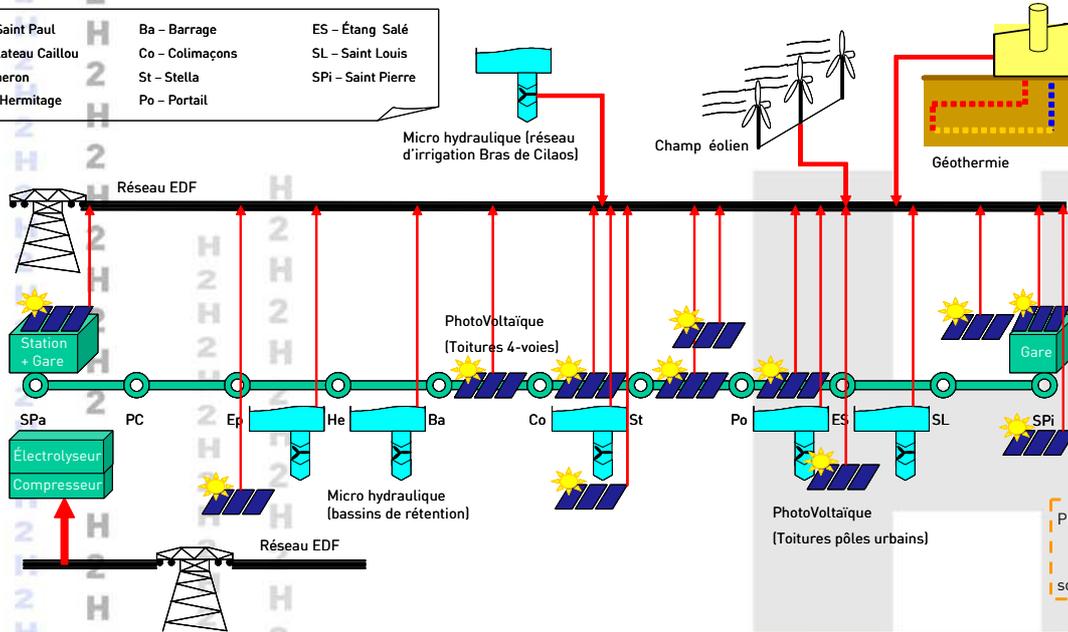


En produits entrants :
- on retrouve l'hydrogène
- l'oxygène, capté dans l'air ambiant

On envisage la production d'hydrogène propre par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable

L'intégration des ENR

- SPa - Saint Paul
- PC - Plateau Caillou
- Ep - Éperon
- He - L'Hermitage
- Ba - Barrage
- Co - Colimaçons
- St - Stella
- Po - Portail
- ES - Étang Salé
- SL - Saint Louis
- SPI - Saint Pierre



Le synoptique des énergies propose une répartition **délocalisée** pour la production d'électricité, nécessaire à la production d'hydrogène -> grâce aux ENR

Production électrique annuelle de 3.8GWh, soit 57.2 tonnes d'hydrogène.

La technologie hydrogène permet une réduction considérable des émissions de polluants et gaz à effets de serre

Impact environnemental

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

(Calculé selon les normes EURO 3, 2001)

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

