



11^{ème} Université d'été Mobilité Propre – Autrans – sept 2018

The slide features a background image of a classical building with a pediment containing the H_2 logo. A blue banner across the middle contains the title. In the foreground, a futuristic blue car is shown splashing through water. To the right, a circular graphic shows a hydrogen molecule (H_2) with the text 'Hydrogen H_2 ' below it. At the bottom, event details are provided.

Hydrogène & Transports

Mythes & Réalités

Hydrogen H_2

11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »
14 septembre 2018 Autrans F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPAC



La vraie question n'est-elle pas L'hydrogène a-t'il un rôle à jouer dans les systèmes énergétiques et la mobilité de demain ?

Favoriser la mise en place du système d'énergies renouvelables

« Décarboner » les usages énergétiques finaux

Permettre une intégration à grande échelle des énergies renouvelables dans la production d'électricité



Distribuer l'énergie dans tous les secteurs et toutes les régions



Servir d'appoint pour conforter le système



Décarboner l'énergie utilisée dans les transports



Décarboner l'utilisation industrielle de l'énergie



Faciliter la décarbonisation du chauffage et de l'alimentation des bâtiments



Servir d'énergie renouvelable supplémentaire



C'est ainsi qu'a été posée la question par le Ministre Nicolas Hulot et son équipe en novembre 2018 à DGEC et au CEA .. pour éclairer un Plan National de Déploiement de l'hydrogène !



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPAC



Le cahier des charges du Plan National Hydrogène

Rebondir sur l'Appel à Projets de 2016 et impliquer la filière industrielle

Un appel à projets en 2016 a permis de révéler un fort potentiel en France

39 « territoires H2 » labellisés pour près de 100 projets candidats. **Une douzaine de projets financés par l'Etat en 2017** (par ailleurs, financements Europe ou collectivités locales)

Aides PIA Ademe de 20M€ à 10 projets pour 50 M€ d'investissement total, 2 autres projets soutenus par CDC et BPI

Le MTES a lancé une mission (DGEC-CEA) pour proposer une stratégie de déploiement de l'H2 d'origine renouvelable

Environ **50 acteurs sollicités** en décembre – janvier sur toute la chaîne de valeur et les usages potentiels

Objectifs :
 Préciser le rôle de l'H2 dans la transition énergétique
 Définir la stratégie française pour la PPE



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

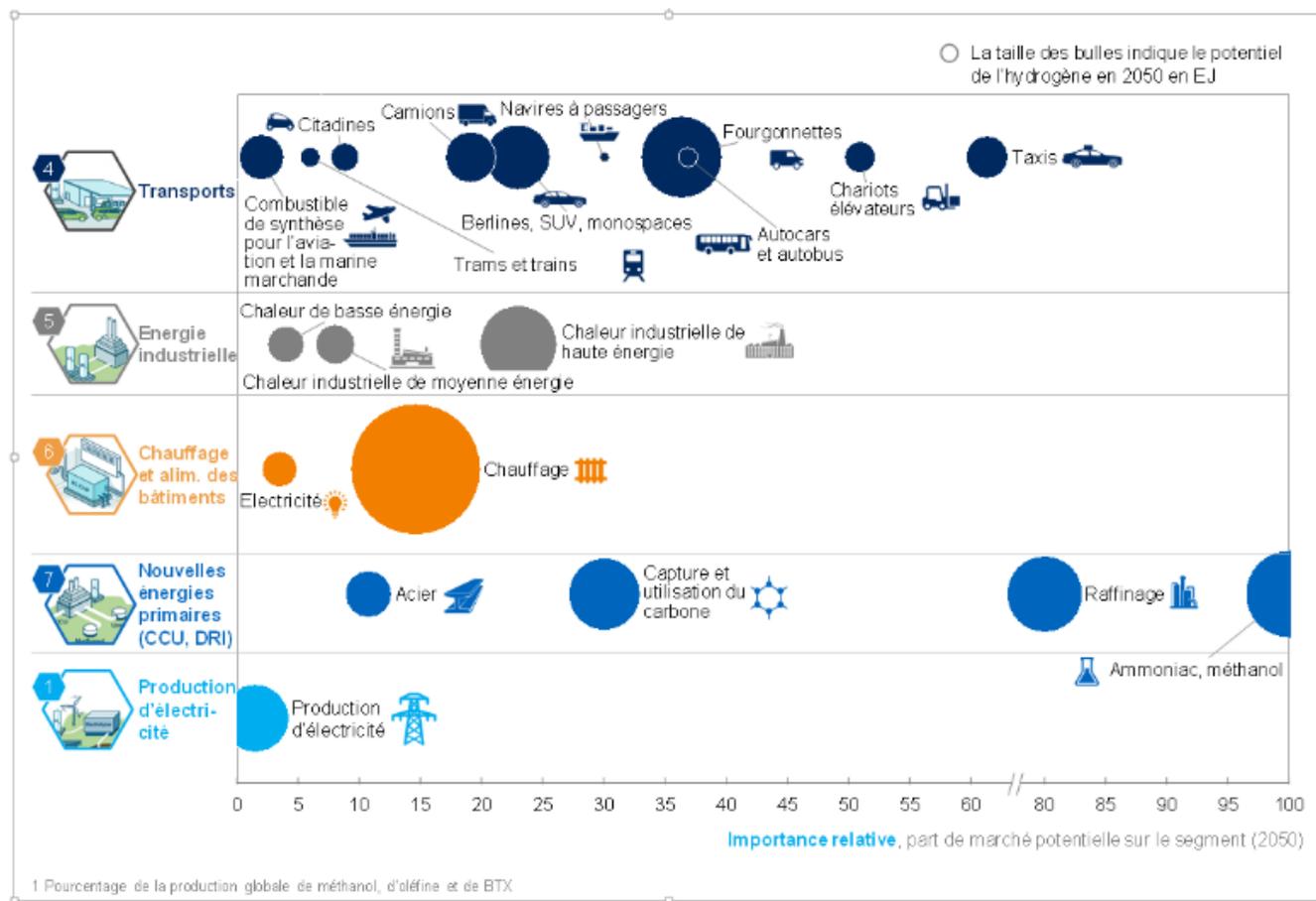
Hydrogène – Une vision partagée pour une feuille de route adaptée au contexte national ?





Etude McKinsey nationale - Taux d'adoption et potentiel global de l'hydrogène à l'horizon 2050 pour les segments de marché

Participants



Trajectoire d'un plan national H2 au service de la transition écologique

- Favoriser l'émergence de l'hydrogène vert en développant l'électrolyse utilisant les énergies renouvelables
 - Développer les énergies renouvelables
 - Faciliter l'accès à l'électricité renouvelable pour l'électrolyse

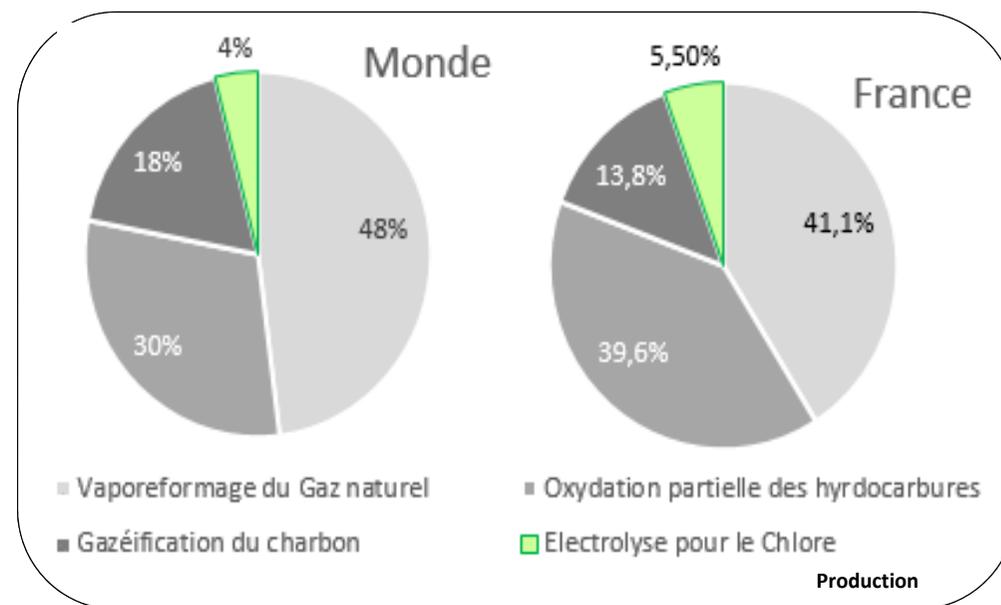
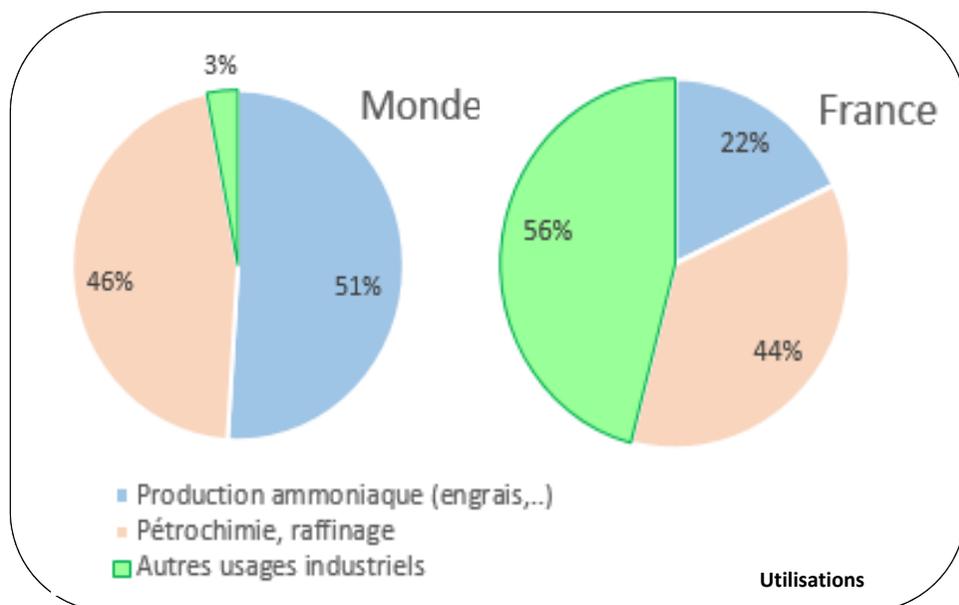


Développer les marchés intérieurs pour cet hydrogène vert

L'hydrogène industriel : un marché directement accessible et offrant des volumes intéressants
 Le stockage des énergies renouvelables du résidentiel aux réseaux (ZNI, TEPCV, Power-to-Gas)
 La mobilité sous toute ses formes, avec une stratégie progressive sur la mobilité terrestre s'appuyant en amorçage sur le modèle de flottes

Premier enjeu – Décarboner la production d'hydrogène

Le marché mondial de l'H2 est aujourd'hui essentiellement industriel (Monde 61 Mt, France 900kT)



■ Usages principaux

- Production d'ammoniacale
- Raffinage des carburants
- Chimie

■ avec un H2 d'origine fossile

- Reformage du méthane (10 kg_{CO2}/kg_{H2})
- Oxydation partielle des hydrocarbures (15 kg_{CO2}/kg_{H2})
- Gazéification du charbon (20 kg_{CO2}/kg_{H2})

Calcul du coût de production du kilogramme d'hydrogène par électrolyse



CAPEX Electrolyseur sortie usine

- Alcalin : 1000 à 350 €/kW
- PEM : 1400 à 400 €/kW
- EHT : 5000 à 400 €/kW



Facteur d'installation

Alcalin et PEM : 1,5 à 1,3
EHT : 1,8 à 1,3



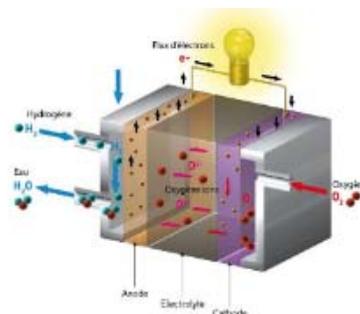
Durée de vie de l'installation : 20 ans

TRI : 6%



Prix de l'électricité

20 à 120€/MWh en fonction de la durée d'utilisation (3000 à 8200h/an)



Rendement électrique d'électrolyse

Alcalin : 65 à 75 %
PEM : 65 à 80 %
EHT : 85 à 95%



Fréquence et coût de remplacement stacks

- Alcalin : 10 ans – 100 à 40 €/kW
- PEM : 7 ans - 400 à 40 €/kW
- EHT : 3 ans - 1000 à 40 €/kW

11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

Les coûts de l'électricité baissent avec l'introduction des énergies renouvelables

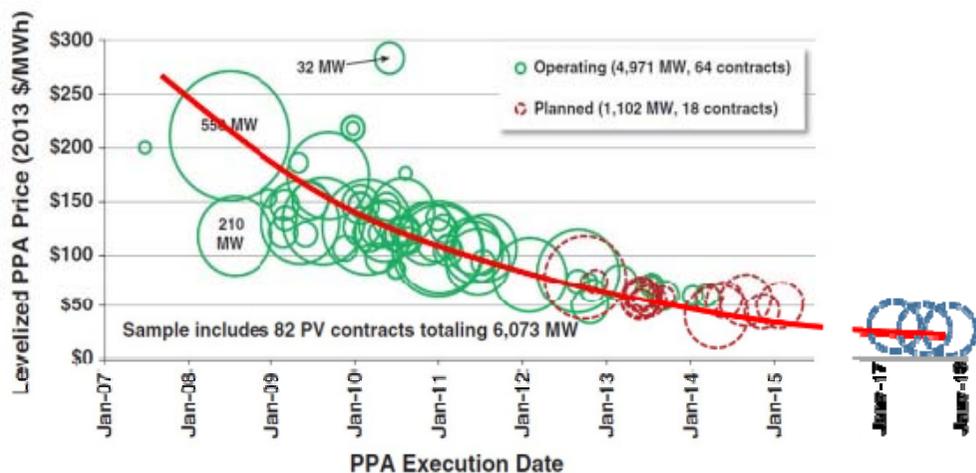
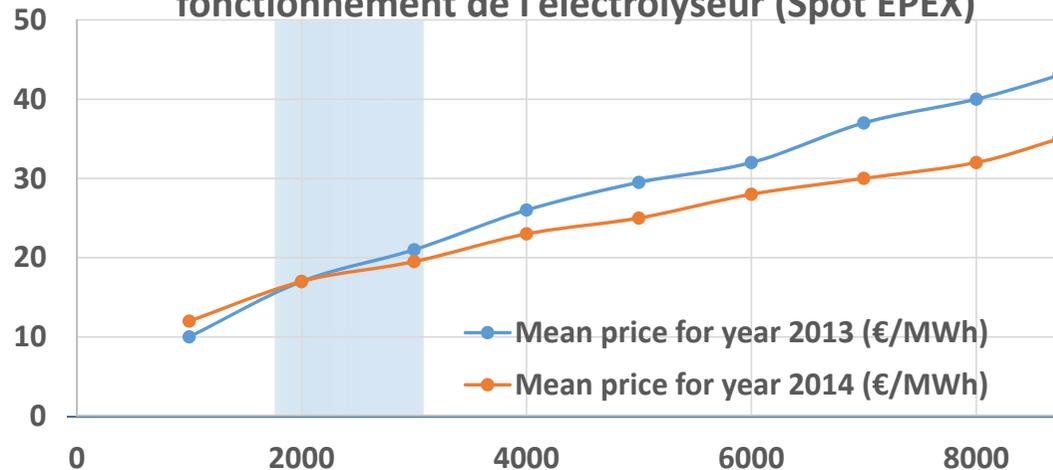


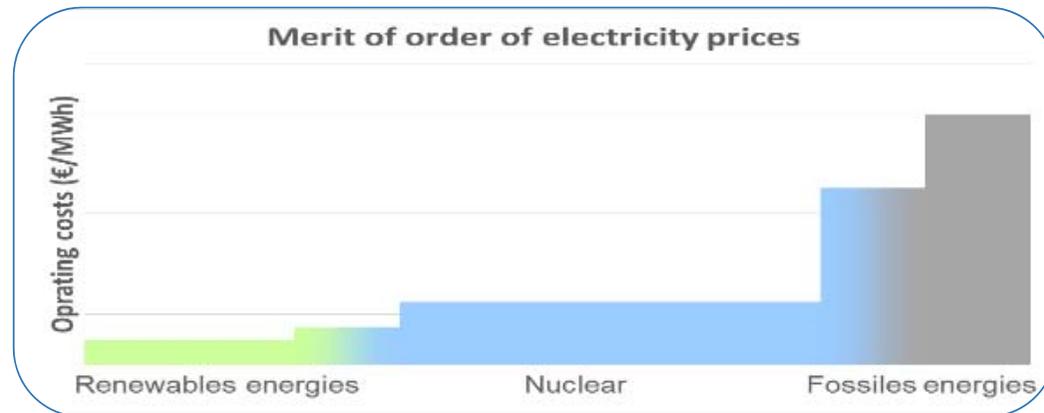
Figure 1. Levelized US utility-scale photovoltaic power purchase agreement (PPA) prices by operational status and PPA execution date.

| | | | |
|-----------------|----------------------|--------------|-------------|
| begin 2017 | United Arab Emirates | \$24,20 /MWh | 20,33 €/MWh |
| Summer 2017 | Chile | \$21,48 /MWh | 18,04 €/MWh |
| Forecasted 2018 | Saudi Arabia's | \$17,90 /MWh | 15,04 €/MWh |

Prix moyen de l'électricité vs nombre d'heures de fonctionnement de l'électrolyseur (Spot EPEX)



Merit of order of electricity prices

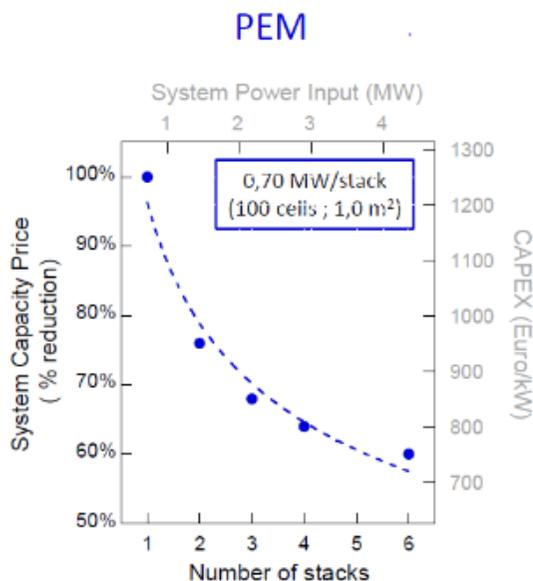


Le coût des systèmes électrolyseurs baissent continuellement depuis près de 10 ans

ITM Electrolyzer

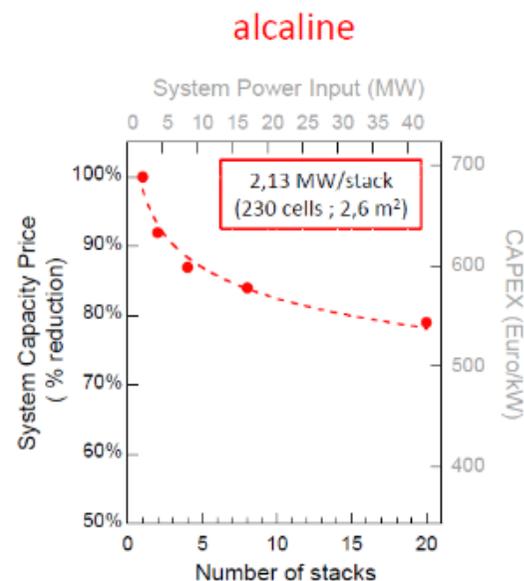


- From 60 kW to 1030 kW
- From 25 to 460 kilos per day.
- Pressure from 20 to 80



Data from ITM Power

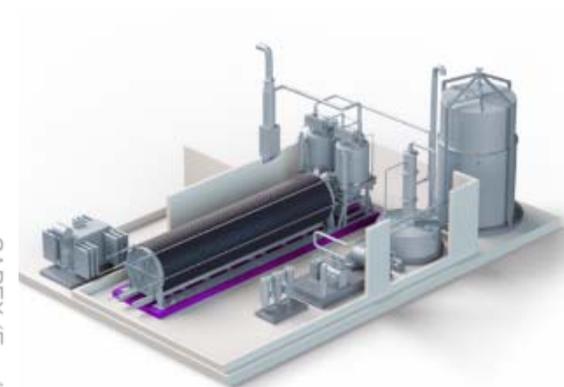
Down to 700 €/kW



Data from NEL

Down to 500 €/kW

NEL Electrolyzer



- Cell stack power consumption of down to 4 kWh/Nm³ H₂,
- up to 2.2 MW per stack
- 1000 kilos per day.

Le coût de l'hydrogène par électrolyse est déjà compatible avec des marchés de l'hydrogène pour usage industriel

Alcaline

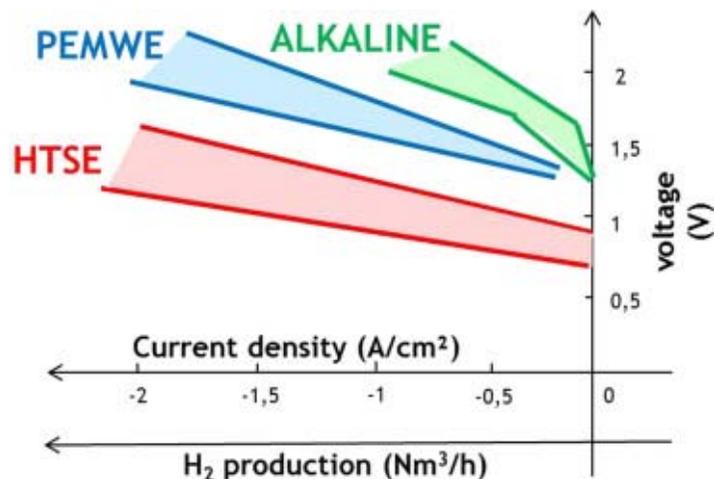
| | | Durée de fonctionnement annuelle électrolyseur | | | | |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|
| | | 8200 h | 5000h | 3000h | | |
| | | Prix de l'électricité (€/Mwh _e) | | | | |
| Massification de production d'électrolyseurs (MW/an/usine) | CAPEX système électrolyseur (€/kW) | 80 | 60 | 40 | 40 | 30 |
| | | 1 | 1000 | 5,60 | 3,87 | 3,32 |
| 20 | 750 | 5,15 | 3,27 | 2,71 | 4,36 | 3,85 |
| 200 | 500 | 4,46 | 2,49 | 1,97 | 3,10 | 2,62 |
| 1000 | 350 | 3,95 | 1,93 | 1,44 | 2,19 | 1,75 |

Coût de production de l'hydrogène compris entre 2 and 4,5 €/kg



- **Décarbonation de l'hydrogène marchand : Consommateur moyen (500 à 5000T/an)**
Remplacer une production centralisée carbonée avec distribution par camion par une production sur site par électrolyse.
- **Décarbonation des industries fortement émettrices de CO2 (valorisation du CO2 en méthane ou autre molécule d'intérêt)**
Installer des électrolyseurs sur le site des cimenteries, aciéries, .. , pour combiner H2 et CO2 (modèle cimentier vers les territoires)

L'électrolyse à Haute Température pour faire encore baisser les coûts de production de l'hydrogène



Electrolyseur EHT du CEA

EHT

Puissance – 6 kW
 Variation de charge – 0% - 100%
 Rendement électrique (HHV) – **85%**
 Puissance spécifique – 3,5 kWh/Nm³
 Capacité de production – 2 Nm³/h
 Pression H₂ en sortie – 3 bar

Coût de production de l'hydrogène en 2030 compris entre 1 and 1,5 €/kg

| Massification de production d'électrolyseurs (MW/an/usine) | CAPEX système électrolyseur (€/kW) |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 4000 |
| 20 | 1500 |
| 200 | 1000 |
| 1000 | 400 |

| Durée de fonctionnement annuelle électrolyseur | | | | |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 8200 h | 5000h | 3000h | | |
| Prix de l'électricité (€/Mwh _{el}) | | | | |
| 80 | 60 | 40 | 40 | 30 |
| 10,03 | 12,87 | 12,48 | 15,47 | 15,08 |
| 4,59 | 4,15 | 3,78 | 4,82 | 4,45 |
| 3,91 | 3,02 | 2,66 | 3,23 | 2,87 |
| 3,06 | 1,49 | 1,14 | 1,32 | 0,97 |

11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »



Usage industriel – exemple de fourniture d'hydrogène pour le pole de microélectronique MINATEC



Avant 2018 – Fourniture par cadres de bouteilles (3 livraisons par semaine)



Minatec – 10 à 20 Nm³/h



Maintenant – Production on site par électrolyse (McPhy)

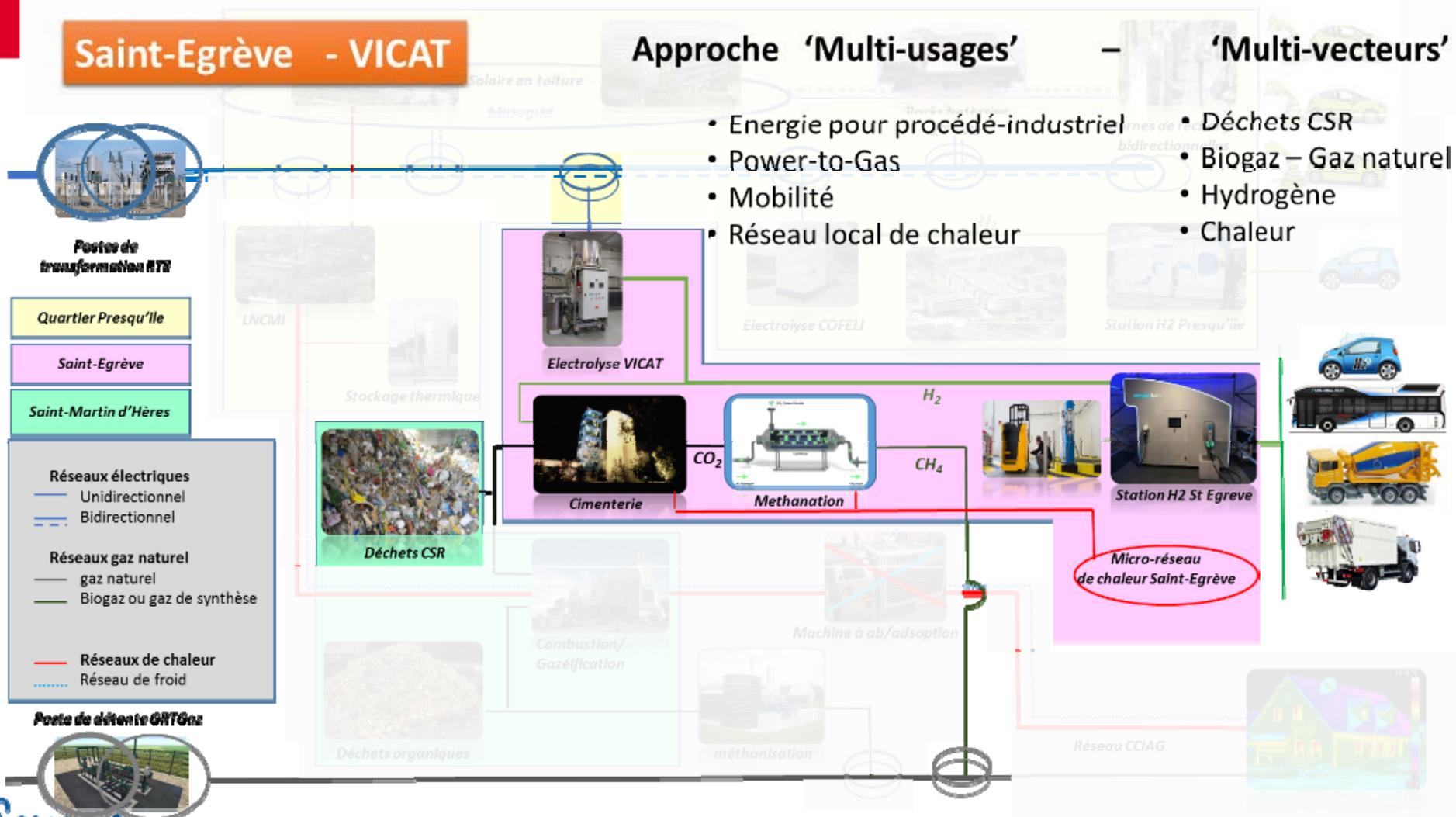


Flotte HYWAY – 3 à 10 kg/j



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

Usage industriel – exemple de la cimenterie VICAT à St-Egrève



- Energie pour procédé-industriel
- Power-to-Gas
- Mobilité
- Réseau local de chaleur
- Déchets CSR
- Biogaz – Gaz naturel
- Hydrogène
- Chaleur

Postes de transformation RTE

Quartier Presqu'île

Saint-Egrève

Saint-Martin d'Hères

Réseaux électriques

- Unidirectionnel
- - - Bidirectionnel

Réseaux gaz naturel

- gaz naturel
- Biogaz ou gaz de synthèse

Réseaux de chaleur

- Réseaux de chaleur
- - - Réseau de froid

Poste de détente GHT Gaz

11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

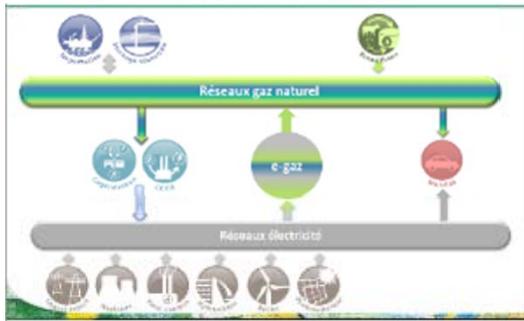
14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYAC



Second enjeu – Stocker les énergies renouvelables



- **Les territoires insulaires**

Territoires pilotes pour développer, qualifier et exporter les technologies de stockage basées sur l'hydrogène

- **L'autoconsommation**

Les bâtiments et territoires à énergie positive avec une gestion intelligente et multi-énergies.

- **Le Power-to-Gas**

Interconnecter les réseaux d'électricité et de gaz pour stocker et transporter l'énergie en grande quantité

L'hydrogène pour stocker les EnR dans les territoires insulaires

Aujourd'hui : entre 186 et 243 €/MWh restitué

2030 : entre 1 et 1,5 €/kg

Stockage des Enr

| PEM | | 3000h- 20 ans ⁽¹⁾ | | | | | Coût kg H2 | Coût MWh électrique restitué |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------------|------------------------------|
| Massification de production d'électrolyseurs (MW/an/voies) | CAPEX système électrolyseur (€/kW) | Prix de l'électricité (€/MWh) | | | | | | |
| | | 80 | 60 | 40 | 30 | 20 | | |
| 0,5 | 1000 | 9,22 | 8,20 | 7,17 | 6,66 | 6,15 | 3,87 | 243 |
| 20 | 850 | 5,77 | 4,82 | 3,87 | 3,39 | 2,91 | | |
| 200 | 700 | 4,86 | 3,97 | 3,09 | 2,64 | 2,20 | | |
| 20000 | 400 | 3,86 | 3,02 | 2,19 | 1,78 | 1,36 | | |
| | | | | | | | | |

Electrolyseur PEM Areva H2 Gen - 180 < P_{MWh} < 240 (€/Mwhe)

| EHT réversible | | 3000h- 20 ans ⁽¹⁾ | | | | | Coût kg H2 | Coût MWh électrique restitué |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------|-------|------|------|------------|------------------------------|
| Massification de production d'électrolyseurs (MW/an/voies) | CAPEX système électrolyseur (€/kW) | Prix de l'électricité (€/MWh) | | | | | | |
| | | 80 | 60 | 40 | 30 | 20 | | |
| 0,5 | 4000 | 11,75 | 10,97 | 10,19 | 9,79 | 9,40 | 2,61 | 131 |
| 20 | 1500 | 5,27 | 4,53 | 3,79 | 3,40 | 3,05 | | |
| 200 | 1000 | 4,40 | 3,69 | 2,97 | 2,61 | 2,26 | | |
| 20000 | 400 | 3,25 | 2,65 | 1,85 | 1,50 | 1,15 | | |
| | | | | | | | | |

Electrolyseur EHT réversible- 53 < P_{MWh} < 130 (€/Mwhe)



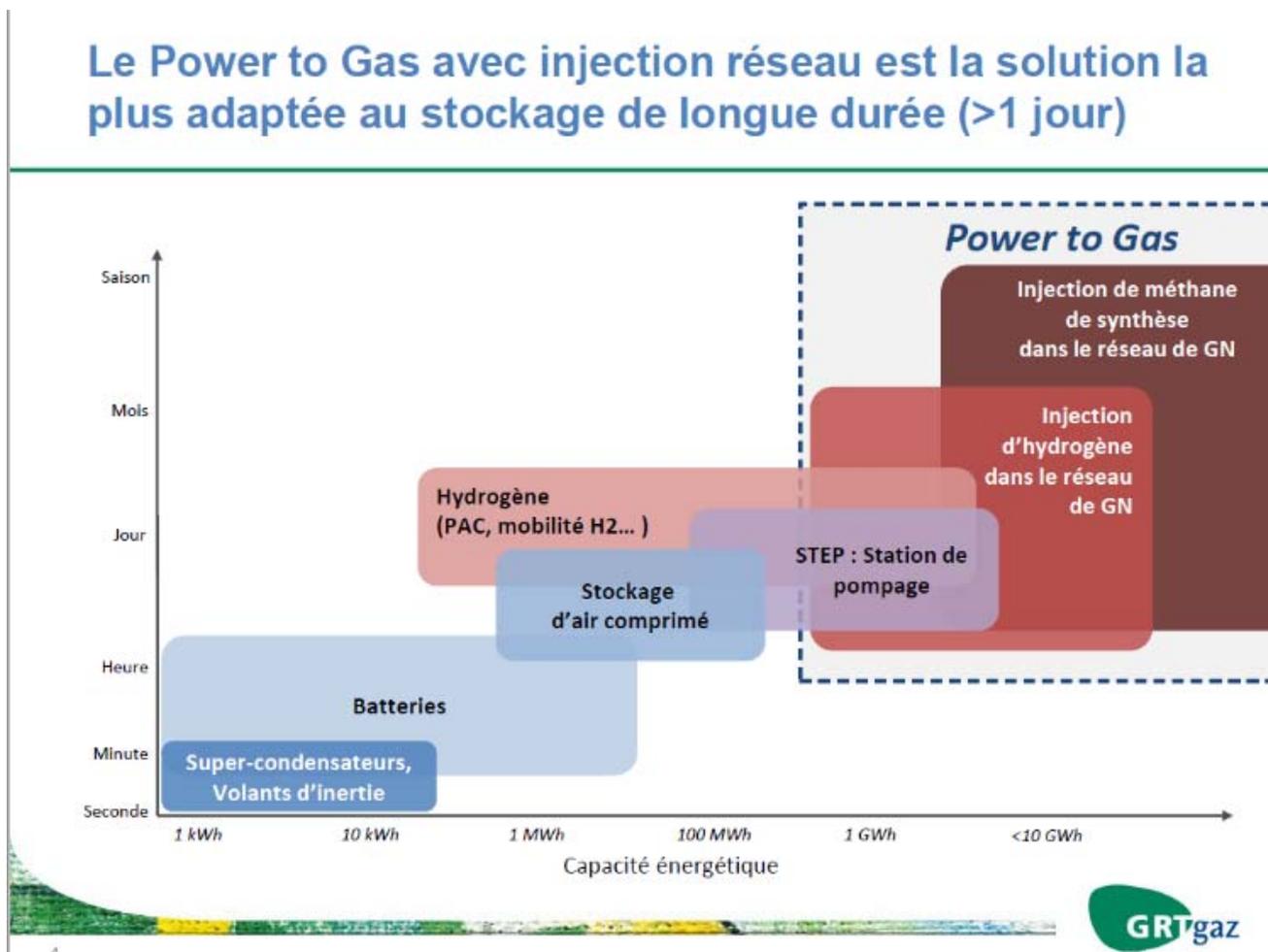
La Nouvelle – Ile de la Réunion
Installation Powidian en partenariat avec EDF SEI



MYRTE à Vignola (Ajaccio)

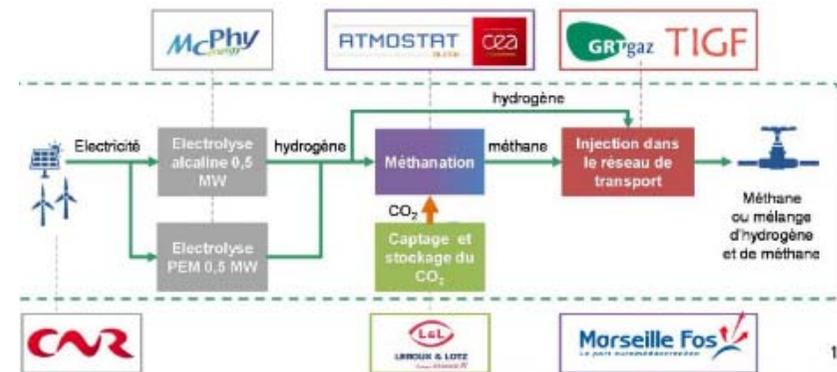
Le Power-to-Gas – une solution pour stocker massivement les énergies renouvelables

Le Power to Gas avec injection réseau est la solution la plus adaptée au stockage de longue durée (>1 jour)





Le Power-to-Gas – une solution pour stocker massivement les énergies renouvelables



Dunkerque

JUPITER 1000 – Fos sur Mer



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYAC

La place de l'hydrogène dans la mobilité électrique



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPC

Troisième enjeu – déployer la mobilité hydrogène



Le dilemme de la Poule et de l'œuf

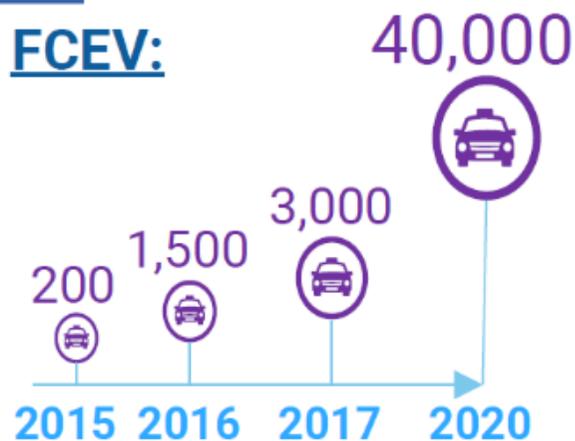
.....

ou des véhicules et des stations

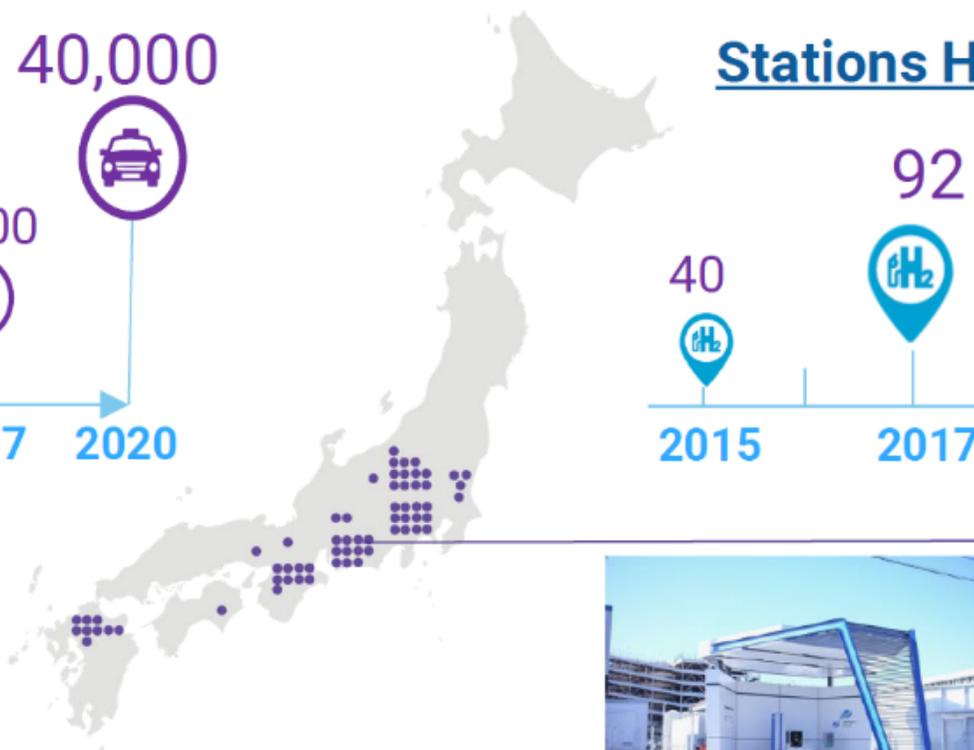
La mobilité hydrogène – Et ailleurs.....

Japon: la plus grande infrastructure H2 dans le monde

FCEV:



Stations H2 :



Nagoya Atsuta

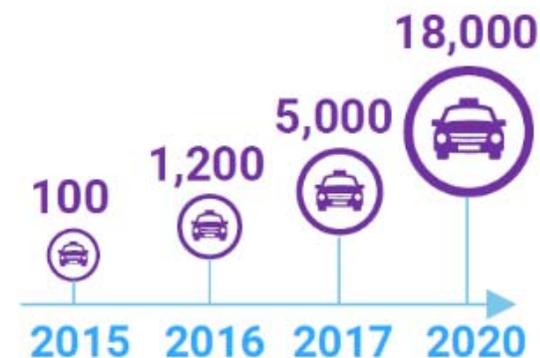
La mobilité hydrogène – Et ailleurs.....

US / Californie – L'effet ZEV

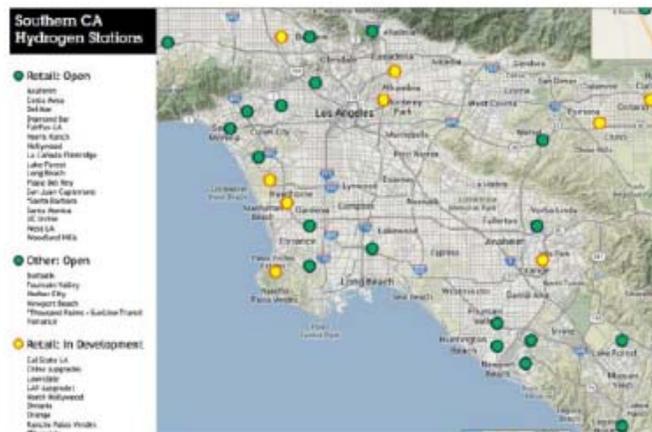


Anaheim H₂ station

FCEV:



Stations H₂ :



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPC

La mobilité hydrogène – Et ailleurs.....

Allemagne – H₂ Mobility: En pleine exécution!



Consortium regroupant Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell and Total pour le déploiement d'un réseau national de stations H₂

- 400 stations d'ici 2023 (100 d'ici 2018)
- 350m € d'investissement
- Max. 90 km de distance entre stations sur autoroute
- 10 stations dans chaque grande agglomération



La mobilité hydrogène – Et ailleurs.....

2015 → 2017: le début de l'exponentielle...



De
1,000
à 10,000
FCEVs!

De 100
à 300
Stations H2!

Le modèle français – déploiement basé sur des flottes de véhicules utilitaires ou commerciaux



Le véhicule range-extend

- Un véhicule électrique à batterie avec un prolongateur d'autonomie à pile à combustible



Modèle de déploiement de flottes de véhicules utilitaires autour d'une station-service

Véhicules légers – Taxis, autopartage, loueurs

- Projet HYPE – La société du Taxi Électrique Parisien mise sur l'hydrogène depuis 2015. Fort aujourd'hui d'une flotte de 75 véhicules, Hype a lancé un appel d'offres pour 130 véhicules supplémentaires, avec un objectif de 600 voitures à horizon 2020. Un marché à saisir pour Toyota, qui compte produire 30.000 Mirai en 2020 contre 3.000 en 2017.

Sébastien Grellier (Toyota France) : « Notre challenge est de proposer d'ici à 2025 les Mirai au prix des voitures hybrides »



Adaptation du modèle économique aux loueurs de véhicules et à l'autopartage.

Des marchés à saisir pour les constructeurs ?

Accroître l'offre de véhicules de flottes

Le déploiement des bus

- Plusieurs collectivités se sont déjà engagés sur la voie des bus à hydrogène
 - Le projet Phébus à Pau : Ce sera le premier bus à haut de niveau de service fonctionnant avec une pile à hydrogène en France. Il sera mis en service fin 2019 dans la ville.
 - Auxerre : la CA prévoit l'acquisition de cinq bus roulant à l'hydrogène et la création d'une station d'approvisionnement pour tester ces bus propres de 2019 à 2021, pour un coût estimé à 8 M€, (18 bus à hydrogène supplémentaires pour desservir toutes les lignes régulières à l'horizon 2023)
 - Versailles Grand-Parc : Pour la première fois, Ile de France Mobilités vient d'autoriser l'acquisition par la Savac, qui exploite le réseau de bus de l'agglomération de Versailles (Yvelines), de deux bus à hydrogène auprès du constructeur Van Hool. Il s'agit pour l'instant d'une expérimentation, qui doit démarrer en 2019 et durer sept ans.



Un constructeur français monte au créneau
SAFRA – Carrossier industriel à Albi

Accroître l'offre de véhicules de flottes

Plan d'action industriel

Nouvelle plateforme fourgon pour l'électromobilité



- L'hydrogène permet d'emporter plus d'énergie dans moins de poids et moins de volume qu'une batterie.
- Une hybridation des deux technologies est donc à optimiser pour répondre aux différentes missions.
- Concevoir et développer un véhicule de la gamme 3,5 tonnes, avec **la PFA, les constructeurs automobiles et les équipementiers automobiles**
- Ce véhicule autorisera les missions à grande autonomie et/ou à usage intensif.



Ce type de véhicule adresse de nombreux segments de marché

- Véhicule livraison dernier kilomètre en sites urbains et péri-urbains
- Véhicules d'intervention technique des opérateurs de réseaux (EDF, ENGIE, Orange, ..)
- Véhicules d'intervention de secours (SAMU, SDIS, ..)
- Véhicules de transport de passagers (9-17 places) autorisés à rouler sur routes et autoroutes (contrairement aux bus).

Accroître l'offre de véhicules de flottes

Coût de l'hydrogène à la pompe



**H2 pour la
mobilité (prix à la
pompe)**

| | 2018 | | | |
|--------------|------------------|-----------|---------------|-----------|
| | Produit sur site | | Livré | |
| | Min | Max | Min | Max |
| Production | 4,0 | 6,0 | 4,0 | 6,0 |
| Transport | - | - | 1,0 | 3,0 |
| Station | 3,0 | 6,0 | 3,0 | 6,0 |
| Total | 7,0 | 12 | 8 €/kg | 15 |
| | €/kg | €/kg | €/kg | €/kg |

Nota bene :
1kgH2/100 kms

Parité avec l'essence
à 8-10 €/kg

| | 2030 | | | |
|--------------|------------------|------------|------------|------------|
| | Produit sur site | | Livré | |
| | Min | Max | Min | Max |
| Production | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 2,0 |
| Transport | - | - | 1,0 | 2,0 |
| Station | 1,5 | 2,5 | 1,5 | 2,5 |
| Total | 3,0 | 4,5 | 4,0 | 6,5 |
| | €/kg | €/kg | €/kg | €/kg |

Aujourd'hui

2030

Autres mobilités – secteurs industriels stratégiques pour la France

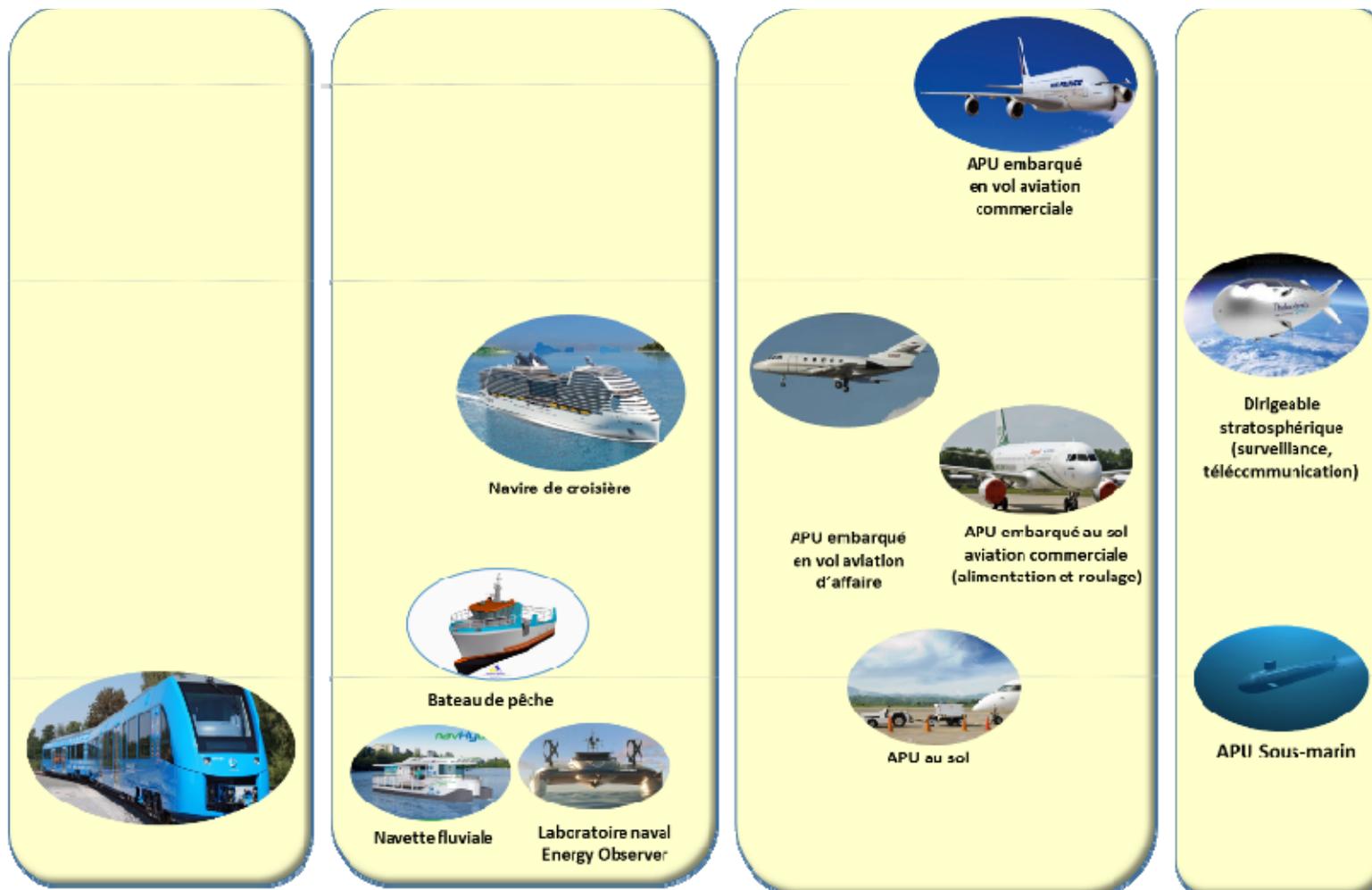
2040

2030

2024

2021

2017



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

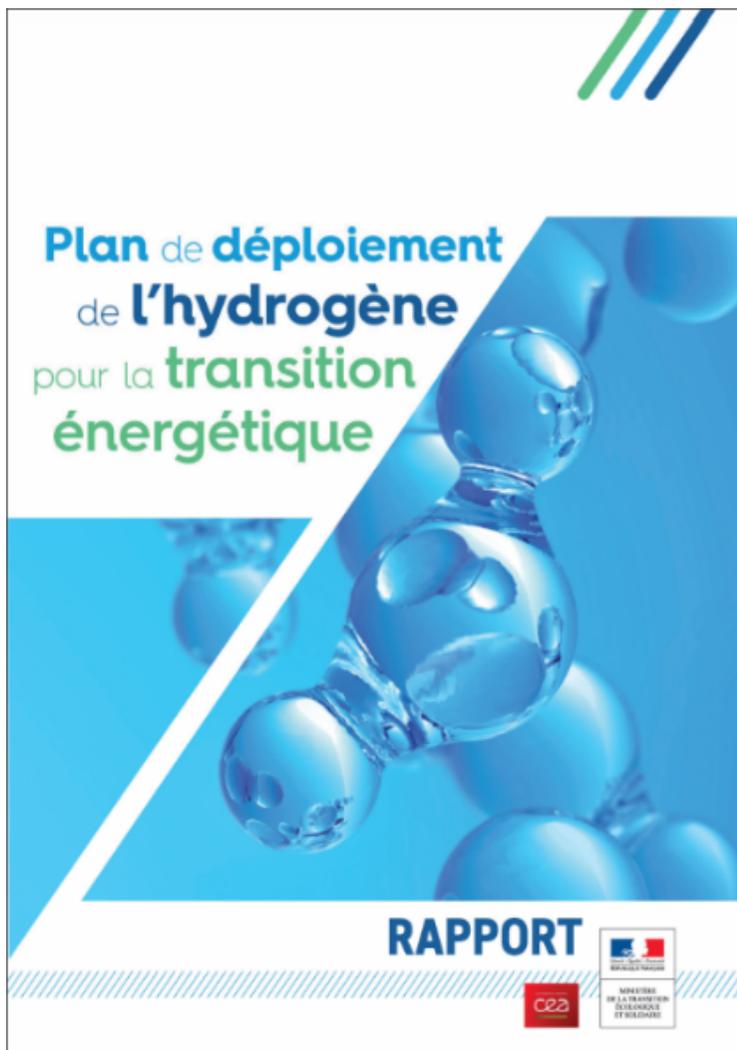
14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPC

L'hydrogène peut soutenir le déploiement des ... bornes de recharges électriques





Merci pour votre attention



11^{ème} Université d'été « Mobilité Propre »

14 septembre 2018

Autrans

F. Le Naour – CEA LITEN / AFHYPC