LE STOCKAGE DE L'ELECTRICITE

Fiche collaborative - Novembre 2012

INTRODUCTION

L'objectif de cette fiche est de présenter de façon synthétique les enjeux et les technologies explorées pour permettre le stockage de l'électricité. Celle-ci étant constituée d'électrons en mouvement, elle ne peut être stockée directement et doit être transformée en une autre forme d'énergie stockable (chimique, gravitationnelle, inertielle, ...). L'utilisation du stock obtenu peut se faire ensuite sous forme d'électricité, de carburant ou de chaleur selon le mode de stockage choisi et le besoin énergétique.
Il ne s'agit pas de faire croire à l'émergence de nouvelles sources infinies d'énergie, mais de présenter les technologies qui pourront participer à l'adéquation entre l'offre et la demande d'électricité en facilitant la gestion de la variabilité de certaines sources d'énergie renouvelable. Aucune technologie miracle ne nous dispensera des efforts d'efficacité et de sobriété énergétique nécessaires à l'émergence d'une société 100% renouvelable.

INTERETS DU STOCKAGE

- Contribuer à compenser la variabilité de la production électrique renouvelable.
- Adapter la fourniture d'électricité à la variation de la consommation.
- Eviter le surdimensionnement de lignes isolées en stockant une partie les jours d'intense production.
- Rentabiliser la production renouvelable en vendant au prix fort lors des pointes l'électricité produite en heure creuse.
- Privilégier le local et l'autonomie, sans pour autant se priver de réalisations plus centralisées si la source n'est pas localisable (éolien off-shore, production marémotrice par exemple).
- Assurer l'autonomie des systèmes nomades (téléphonie mobile par exemple) et des transports.

FACTEURS A PRENDRE EN COMPTE

- Puissance disponible (MW)
- Capacité de stockage (MWh)
- Réactivité et vitesses de montée et de descente en charge
- Densité électrique (MWh/kg) lorsque la portabilité est en jeu
- Durée de vie, nombre de cycles charge-décharge supportables
- Vitesse de charge (problématique pour les véhicules électriques)
- Efficacité kWh in/kWh out
- Coût d'investissement du stockage en €/MWh et en €/MW
- Emprise au sol → besoin en foncier
- Sécurité, environnement, recyclage: impacts réglementaires et environnementaux, risques technologiques, restriction de localisation
- Coûts d'exploitation et de maintenance

- Consommation des auxiliaires et coût d'achat de l'énergie

FINANCEMENT

- La question est de savoir qui financera les unités de stockage:

- le gestionnaire du réseau?
- les consommateurs?
- des opérateurs de stockage qui factureront leurs prestations aux bénéficiaires en fonction de l'usage qu'ils en font?

- On peut en effet envisager plusieurs approches:

- Adjoindre aux installations renouvelables des unités de stockage, gérées à la charge et à la décharge par les soins de l'exploitant, et capables de lisser pour le réseau les baisses de puissances dues aux variations de l'ensoleillement ou du vent. C'est alors le producteur qui a la responsabilité d'assurer la livraison au réseau d'une électricité « de qualité » (volumes prévisibles et garantis)
- Décider que la stabilisation du réseau incombe au gestionnaire de réseau, responsable de constituer des unités de stockage. Ce type de solution permet des économies d'échelle mais conduit à une centralisation des moyens de stockage et une perte de souplesse de gestion.

PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES

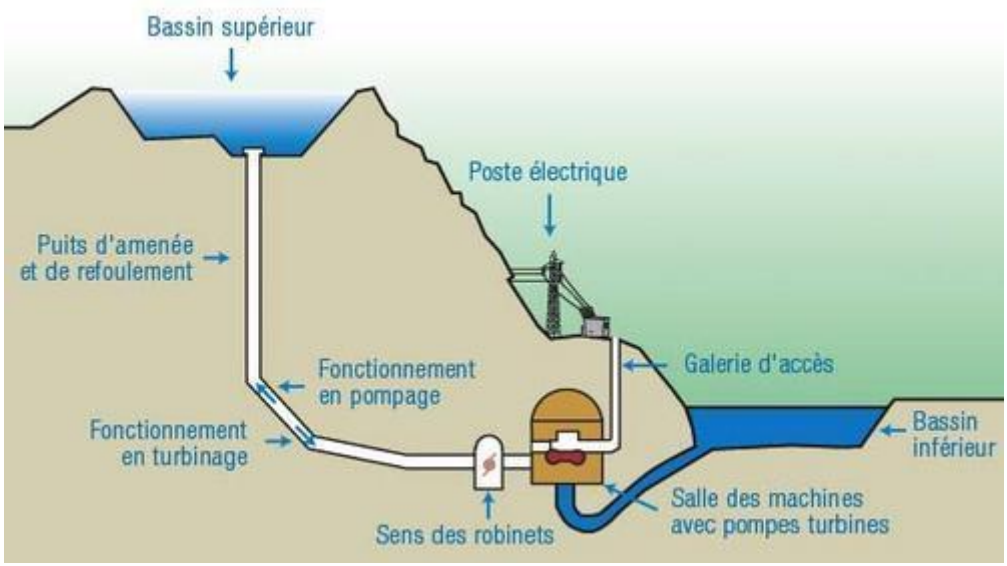
STOCKAGE MECANIQUE DANS DES VOLANTS D'INERTIE.

- Quand de l'énergie électrique est produite en excès, la vitesse de rotation du volant augmente. Il y a ainsi conversion de l'énergie électrique en énergie de rotation. Quand la production d'énergie électrique devient insuffisante, une partie de l'énergie de rotation est récupérée.
- Temps de réaction très court (de l'ordre de la milliseconde) mais temps d'utilisation limité de l'ordre de la seconde à la minute car les quantités d'énergie stockées sont très faibles (5-10 kWh).
- Les volants d'inertie ont une efficacité allant de 80 à 95% mais un coût de l'ordre de 6000 €/kWh.
- Cette technologie est par exemple utilisée dans les transports pour récupérer l'énergie cinétique lors des freinages (Tramway ALSTOM à Rotterdam, Formule 1) ou pour permettre de pallier des ruptures d'alimentations électriques pendant quelques secondes en attendant le démarrage d'un groupe de secours.

STOCKAGE SOUS FORME D'ENERGIE POTENTIELLE

Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

- Cette technologie consiste à pomper de l'eau depuis une retenue inférieure vers une retenue supérieure. L'énergie électrique utilisée pour actionner la pompe est alors convertie en énergie potentielle. Cette dernière peut à nouveau être convertie en électricité en actionnant une turbine hydraulique. L'opération affiche un rendement pouvant aller jusqu'à 80% avec des temps de réponse de l'ordre de quelques minutes.



Principe de fonctionnement d'une STEP

- Il s'agit de la technologie de stockage de l'électricité la plus mature, avec des durées de vie très importantes et des coûts d'investissement variant entre 1000 et 2000 €/kW et entre 60 et 400 €/kWh.
- Elles ne peuvent être implantées n'importe où car leur localisation dépend de la topographie, de l'hydrographie ou encore de la présence de lignes électriques.
- Il existe dans le monde 300 STEP pour une puissance totale de 150 GW. La grande majorité des STEP sont installées en montagne, même si certaines ont été implantées en bord de mer avec des retenues d'eau en bas et en haut d'une falaise.
- La France possède 6 STEP pour un total d'environ 5000 MW de puissance de production cumulée, et une production annuelle de 5,5 TWh. La plus grande mise en serive en 1987 à Grand Maisons dans l'Isère, affiche une puissance de 1690 MW avec une hauteur de chute de 930 mètres. Le gisement de STEP supplémentaires en montagne serait de l'ordre de 4000 MW.
- La Norvège et la Suisse possèdent 60% du potentiel de pompage turbinage à eau douce de l'Europe. L'une des pistes explorées par l'Allemagne pour atteindre 100% d'électricité renouvelable est la construction d'une liaison électrique sous-marine à courant continu très haute tension (HVDC) pour interconnecter les parcs éoliens off-shore allemands et les STEP norvégiennes.
- <u>Projet remarquable</u> :

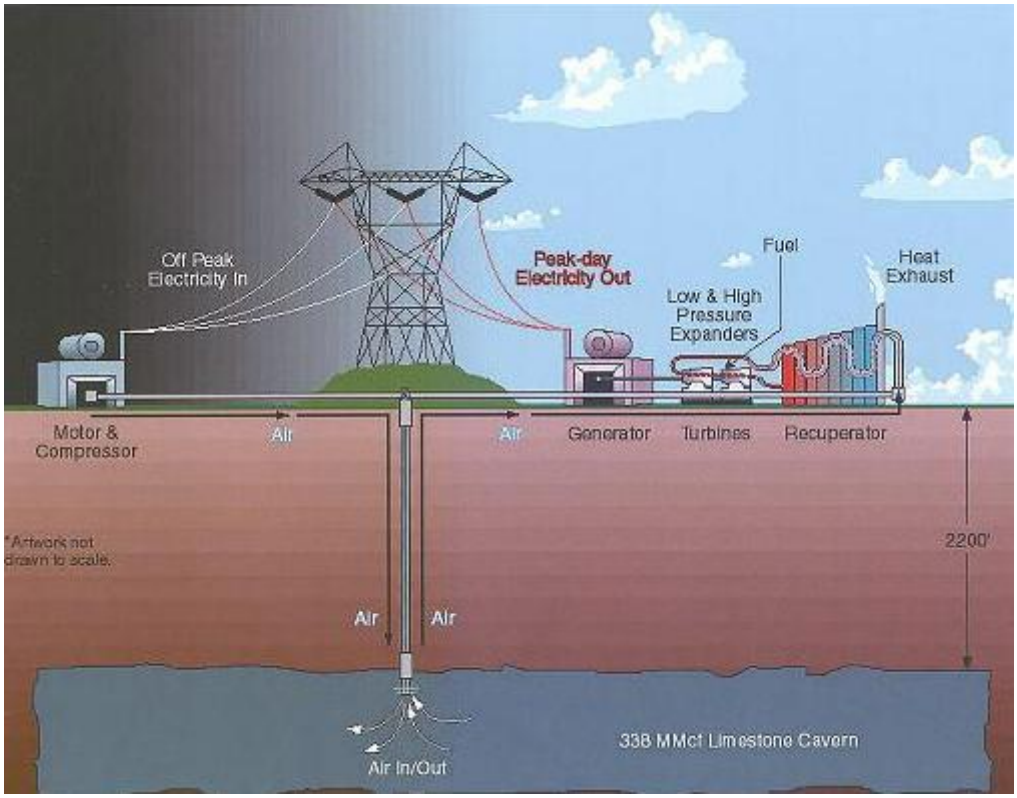
- Sur l'île espagnole d'El Hierro, dans les Canaries, une STEP de 11,32 MW (4 turbines Pelton de 2,83 MW) couplée avec un parc éolien de 11,5 MW permet de répondre à 80% de la demande énergétique annuelle de l'île.
- Le bassin inférieur a un volume de 150 000 m3
- Le bassin supérieur, situé en haut d'une falaise à 658 mètres au-dessus du niveau de la mer, a un volume de 556 000 m3, 406 000 m3 étant réservés pour la consommation d'eau douce.

La compression d'air (Compressed Air Energy Storage CAES) :

- Une centrale de stockage de l'énergie par air comprimé est une centrale à gaz modifiée. Elle fonctionne selon les trois étapes suivantes :

- L'air extérieur est compressé grâce à des compresseurs. On utilise de l'électricité en provenance du réseau lors des périodes de faible demande. L'air comprimé est injecté et stocké dans des réservoirs souterrains (cavité rocheuse, cavité saline, nappe aquifère).

- Lors des périodes de pointe, l'air est chauffé dans une chambre de combustion où du gaz se mélange à l'air comprimé et s'enflamme.
- Les gaz chauds se détendent en traversant une turbine, où leur énergie thermique est transformée en énergie mécanique qui permet d'actionner un alternateur pour la production d'électricité.



Principe d'une installation CAES (Image : CAES Development Co)

- Le rendement de cette technologie reste limité à 50%, mais la récupération de la chaleur produite en compression doit permettre d'atteindre un rendement de 75% (on parle alors de CAES adiabatique). Cette technologie permet également d'éviter le recours à du gaz naturel pour réchauffer l'air comprimé.
- Le stockage d'énergie par compression d'air présente l'inconvénient de nécessiter l'utilisation de cavités géologiques de grandes dimensions avec une bonne étanchéité soit existantes soit à créer, ce qui entraîne des temps de réalisation longs (3 à 6 ans) et des questions sur la stabilité dans le temps.
- Coûts d'investissement : 700 €/kW et 10 €/kWh pour les CAES classiques, 1000 €/kW et 30 €/kWh pour les CAES adiabatiques.
- Coûts d'exploitation : 1-2 €/MWh pour les CAES classiques, 5€/MWh pour les CAES adiabatique.
- Coûts de maintenance : 7-10 €/kW/an pour les CAES classiques, 30 €/kW/an pour les CAES adiabatiques.
- Durée de vie : 30 ans.
- Une variante à petite échelle de ce système est à l'étude avec des véhicules équipés de moteurs électriques à air comprimé. Lorsque le véhicule ne circule pas, il peut être raccordé au réseau pour et y injecter de l'électricité en consommant une partie de sa réserve d'air comprimé.[1]

[1] http://investincotedazur.com/fr/newsletter/mdi-trois-voitures-a-air-comprime-commercialisees-des-l-an-prochain&artid=act10726

- Projet remarquable : L'installation de Power South inaugurée en 1991 à McIntosh en Alabama stocke l'électricité produite en excès la nuit pour la revendre aux périodes de forte demande. Elle est capable de fournir une puissance de 110 MW avec un temps de réponse de 14 minutes[2].

STOCKAGE SOUS FORME D'ENERGIE ELECTROCHIMIQUE DANS DES BATTERIES

- L'électricité est utilisée pour « alimenter » une réaction chimique entre deux électrodes solides, la cathode et l'anode, qui échangent des ions au travers d'un électrolyte. La réaction inverse permettant de régénérer une partie de l'électricité initiale.
- La capacité de stockage varie entre 10 kWh et 10 MWh, pour des puissances pouvant aller jusqu'à plusieurs mégawatts et une efficacité de 80% pour les meilleurs systèmes.
- Les batteries sont utilisées pour des besoins modérés et très localisés, car les quantités d'énergie stockée restent faibles, mais elles sont très répandues en pratique.
- Il est possible de stocker l'énergie dans des batteries stationnaires, ou dans des batteries embarquées dans des véhicules électriques. Une batterie de véhicule électrique apportant une capacité de stockage de 24 kWh, un million de véhicules constitue une réserve de 24 GWh, soit une puissace électrique de 1 GW disponible pendant 24 heures, ou en supposant une généralisation des dispositifs de charge rapide, de 48 GW pendant 30 minutes.
- Des systèmes de smart grid baptisés G2V-V2G (grid to vehicle – vehicle to grid) permettent d'optimiser la gestion des cycles de charge/décharge des batteries des véhicules électriques et leur couplage à la production d'énergie renouvelable photovoltaïque ou éolienne.
- Ci-dessous un aperçu des différentes technologies de batterie :

→ Batteries plomb / acide
→ Batteries Nickel-cadmium
→Batteries Nickel – hydrure métallique
→ Batteries lithium-ion
→ Batteries lithium phosphate-fer
→ Batteries sodium-soufre
→ Batteries redox flow : à la différence des batteries classiques, les matières actives ne sont pas contenues dans deux anodes solides mais sont en solution dans deux électrolytes liquides séparés par une membrane échangeuse d'ions. Les électrolytes sont stockés dans deux réservoirs distincts et amenés par pompage au contact de la membrane où la réaction va se produire et libérer les électrons dans le circuit. Les développements, orientés essentiellement vers des applications stationnaires, sont focalisées sur trois systèmes : vanadium-vanadium, vanadium-brome et zinc-brome.

- Projets remarquables :

- Sur l'île de la Réunion a été Installée en 2010 une batterie sodium-soufre permettant de restituer une puissance de 1 MW pendant 7 heures. Elle pèse 100 tonnes et affiche un rendement de 80%. Elle a nécessité un investissement de 3,5 millions d'euros. Son constructeur japonais NGK garantit une permanence de sa capacité pendant 15 ans.[3]
- Le projet G2V-V2G « Yokohama Smart City Project » a pour objectif de mettre en place, entre 2010 et 2014, un smart grid intégrant 2000 véhicules électriques et une puissance photovoltaïque de 27 000 MWc répartis chez 4000 foyers

SUPERCAPACITES ET SUPRACONDUCTEURS

[2] http://www.powersouth.com/mcintosh_power_plant/compressed_air_energy
[3] http://www.enerzine.com/14/10048+batterie-de-stockage-delectricite-1-mw-a-la-reunion+.html

Les super capacités : stockage électrostatique

- La constitution d'un supercondensateur est similaire à celui d'une batterie : deux électrodes avec un séparateur intunercalé, le tout étant imprégné par un électrolyte. Les ions provenant de l'électrolyte sont stockés au voisinage de la surface des deux électrodes chargées, l'interface faisant office de couche diélectrique. On appelle ce principe double couche électrochimique.
- Par rapport aux batteries, ils présentent l'avantage de ne pas entraîner de modification chimique, ce qui augmente le nombre de cycles charge – décharge possibles et donc la durée de vie.
- Ils emmagasinent moins d'énergie spécifique (Wh/kg) que les batteries, mais sont capables de la décharger dans un temps court et possèdent donc une puissance spécifique (W/kg) plus élevée que les batteries.
- Les applications incluent les véhicules électriques (par exemple comme tampon d'énergie entre le variateur de vitesse et les batteries) ou encore les alimentations électriques de secours (télécoms, électronique grand public…).

Les matériaux supraconducteurs : stockage électromagnétique ou SMES (Superconductor Magnetic Energy Storage)

- Les systèmes SMES stocke l'énergie sous forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu dans un anneau supraconducteur fonctionnant en dessous de sa température critique, et donc sans pertes par effet Joule.
- Ce système se destine au stockage de grandes quantités d'énergie, dont 50% peuvent être restituées en moins d'une seconde. De plus, un tel dispositif bénéficie d'un rendement de l'ordre de 90 %.
- Toutefois, les applications de SMES, aux coûts encore très élevés, sont encore limitées et doivent démontrer leur faisabilité à grande échelle, du fait de la nécessité de maintenir une température très basse. Elles sont développées essentiellement aux États-Unis. Un prototype de plusieurs centaines de kJ a cependant été réalisé à l'institut Néel à Grenoble[4].

STOCKAGE SOUS FORME D'HYDROGENE

- L'électricité en excédent est utilisée pour conduire la relation d'électrolyse de l'eau dans un électrolyseur : $2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$. Cette réaction a un rendement maximal de 80%.
- A noter que l'hydrogène peut être obtenu par d'autres voies que l'électrolyse, plus ou moins matures : vaporeformage, gazéification, pyrolyse, reformage plasma, thermolyse, photoélectrolyse, biofermentation, électrolyse microbienne…
- Plusieurs pistes sont explorées afin de permettre le stockage et le transport du dihydrogène obtenu :

- stockage sous forme liquide : Opération très énergivore qui consomme entre 30 et 40% de l'énergie disponible et nécessite une très forte isolation thermique du fait de la température très basse (-250°C).
- stockage sous forme gazeuse à haute pression (150 à 300 bars). Cette opération consomme environ 20% de l'énergie disponible.
- stockage dans des hydrures de métaux ou des nanotubes de carbone

- Le dihydrogène peut également être injecté dans le réseau existant, en le mélangeant au gaz de ville. Le taux d'incorporation possible à l'heure actuelle est de l'ordre de 5%, et pourrait

[4] http://neel.cnrs.fr/spip.php?article760

atteindre 15% à moyen terme[5].
Il peut également être transformé en un autre composant chimique plus facilement stockable ou transportable :
- le méthane CH4 grâce à la réaction de méthanation (rendement de 40%)
$CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$. Le méthane présente l'intérêt de pouvoir être injecté directement dans le réseau de gaz actuel.
- l'ammoniac grâce au procédé Haber-Bosch $N_2+3H2 \rightarrow 2NH_3$

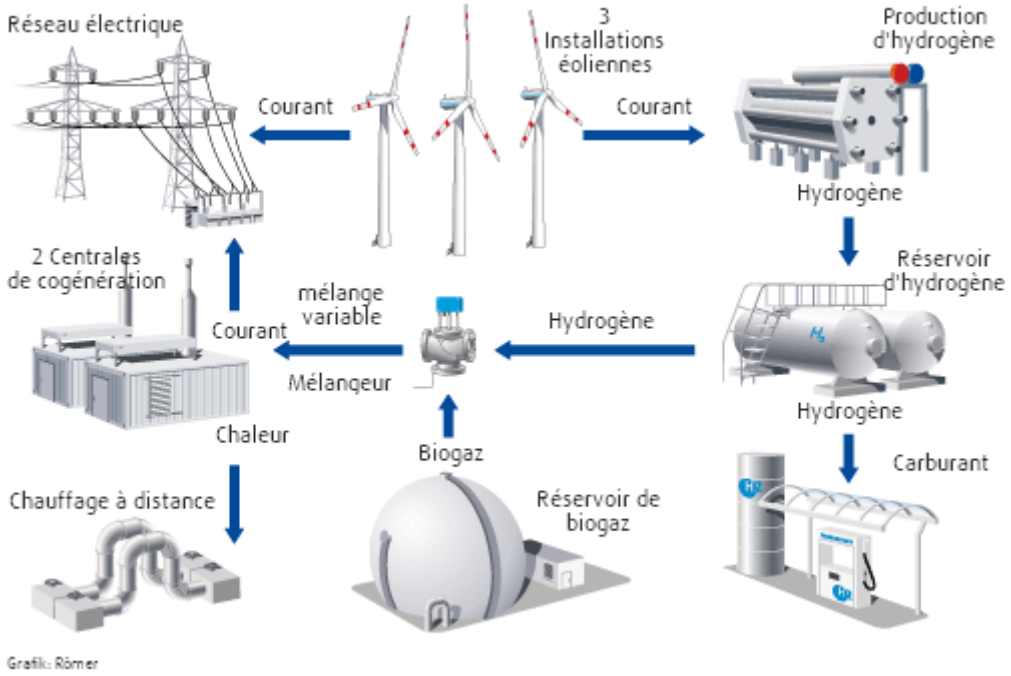
- En brûlant le dihydrogène dans une pile à combustible (constituée comme les batteries par deux électrodes séparées par un électrolyte), on peut régénérer une partie de l'énergie stockée. $H_2 + ½ O_2 \rightarrow H_2O$ + *chaleur + électricité*. Les piles à combustible les plus performantes pourraient atteindre un rendement de 50%, voire 70% en cas de récupération de la chaleur produite.
- Ci-dessous un aperçu des différentes technologies de piles à combustibles[6] :

Type de pile	Electrolyte	Température de fonctionnement	Gamme de puissance
Alkaline fuel cell (AFC)	Potasse liquide	80°C	1 à 100 kW
Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)	Polymère solide	80°C	1W à 1 MW
Direct Methanol fuel cell (DMFC)	Polymère solide	80°C	1W à 1 MW
Phosphoric Acid fuell cell (PAFC)	Acide phosphorique liquide	200°C	200 kW à 10 MW
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	Sels fondus	650°C	500 kW à 10 MW
Solid Oxide fuel cell (SOFC)	Céramique	700 à 1000°C	1 kW à 10 MW

- Projet remarquable : Centrale hybride de Prenzlau : inaugurée en octobre 2011, cette centrale associe 3 éoliennes de 2 MW, deux unités de biogaz de 360 kW et un électrolyseur d'une capacité de 500 kW[7].

[5] http://www.enerzine.com/12/12981+enr---de-lhydrogene-sera-injecte-dans-le-reseau-de-gazoducs.html?pse=Raoul-78&posts_usersPage=2

[6] source « Le stockage de l'énergie », Pierre Odru, Dunod
[7] https://www.enertrag.com/download/prospekt/centrale-hybride-infos-techniques-fr.pdf



Principe de fonctionnement de la centrale hybride Enertrag de Prenzlau

STOCKAGE SOUS FORME DE CHALEUR

- Le stockage d'électricité sous forme de chaleur suit les étapes suivantes :
  - Durant la phase de stockage, l'électricité est utilisée pour entraîner une pompe à chaleur qui va transférer les calories de l'enceinte basse température à l'enceinte haute température via un gaz caloporteur circulant en circuit fermé.
  - L'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie thermique dans des matériaux réfractaires poreux (permettant la circulation verticale de gaz) contenus dans des enceintes thermiquement isolées qui peuvent atteindre une température de 800°C.
  - Durant la phase de décharge, cette pression est libérée pour alimenter une turbine qui entraîne une génératrice renvoyant l'énergie dans le réseau.
- <u>Projet remarquable</u> : En France, le projet Sether rassemble des acteurs industriels (Poweo et Saipem) et des centres de recherche (CEA, Onera, Cnam). Il vise à atteindre un rendement de 70%.

PROPOSITIONS

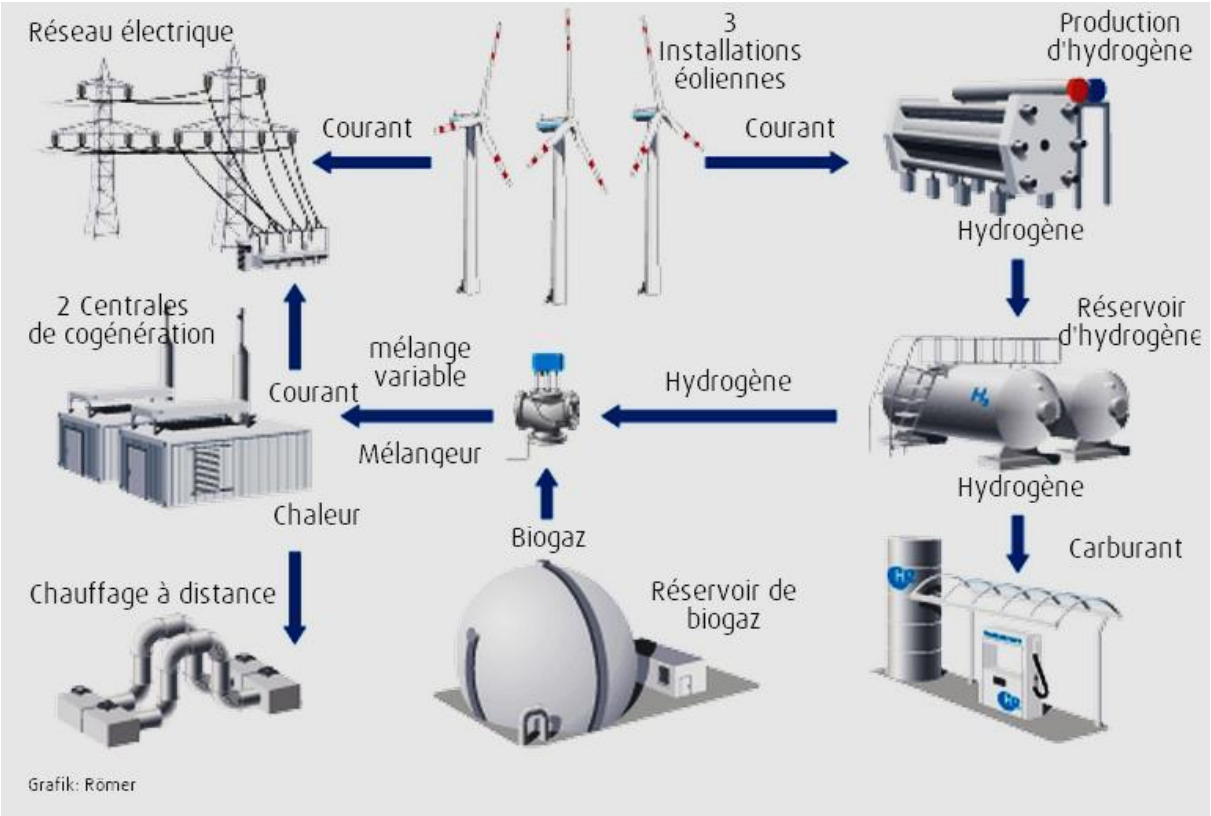
Associer un site de stockage d'électricité aux champs photovoltaïques ou d'éoliennes off-shore prévus en France

Développer les plateformes, genre MYRTE

Partout où on installe des champs photovoltaïques on peut envisager de leur adosser une plateforme de ce genre, dans les îles certes mais aussi sur le continent.

Le 9 janvier dernier, au Centre de Recherches Scientifiques Georges Peri de l'Université de Corse, a été inaugurée la plateforme MYRTE (Mission hYdrogène Renouvelable pour l'inTégration au réseau Electrique). Fruit d'une collaboration entre l'Université de Corse, le CEA et l'entreprise Hélion, ce projet a pour objectif de tester en vraie grandeur une installation unique en son genre, permettant de capter de l'énergie solaire et de la stocker sous la forme d'hydrogène afin de la réinjecter dans le réseau électrique quand celui-ci est demandeur. Pour ce faire, 3 700 m2 de panneaux solaires ont été installés sur ce site corse. L'électricité ainsi produite par ces panneaux est alors injectée dans un électrolyseur à eau qui va séparer l'oxygène et l'hydrogène. Stocké, l'hydrogène est ensuite envoyé vers une pile à combustible quand le réseau nécessite un supplément d'électricité.
http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/68884.htm

S'inspirer de la réalisation allemande



Centrale **hybride** de Prenzlau dans le Brandebourg, inaugurée le 25 octobre 2011

Stimuler la recherche

Un projet de recherche allemand a débouché sur un procédé de stockage de l'électricité sous forme de méthane.
http://www.industrie.com/it/stocker-l-electricite-renouvelable-sous-forme-de-methane.9834

Rechercher un site favorable pour tester en France ce procédé et l'intégrer peu à peu dans d'autres sites favorables à recenser.

Batteries sodium-soufre (NaS)

Développer cette technologie déjà installée sur l'île de La Réunion sur la commune de Saint-André.

Cela peut être envisagé au niveau des régions, voire de communes.

La maison autonome

Créer une ou plusieurs maisons témoins poussant l'autonomie jusque dans le stockage de l'électricité, avec PAC réversible, stockage d'hydrogène sous forme d'hydrure de magnésium.

Dans les hydrures métalliques l'hydrogène est stocké sous forme atomique (H) et non plus moléculaire (H2) annulant ainsi les risques d'explosion.

Des maisons témoins favoriseraient la recherche et le développement vers l'autonomie immobilière.

ANNEXES

Batteries

L'électricité permet « d'alimenter » une réaction chimique, l'énergie est stockée sous forme chimique.
Capacité de stockage varie entre 10 kWh et 10 MWh, pour des puissances pouvant aller ***jusqu'à plusieurs mégawatts et une efficacité de 80% pour les meilleurs systèmes.***
Les batteries sont utilisées pour des besoins modérés et très localisés, car les quantités d'énergie stockée restent faibles, mais elles sont très répandues en pratique.

- **Batteries Nickel-cadmium**
  - Un accumulateur nickel-cadmium ou Ni-Cd est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'oxyhydroxyde de nickel et du cadmium comme électrodes.
  - <u>Accumulateurs grand public</u>
    Appelés communément "piles rechargeables" et accumulateurs "portables" dans le jargon de la directive européenne 2006/66/CE1 qui encadre les piles et accumulateurs en UE). Les batteries Ni-Cd sont aujourd'hui relativement dépassées en termes d'autonomie, et ne sont plus vendues dans l'Union européenne (suite à l'interdiction de l'utilisation du cadmium dans les accumulateurs portables prévue par la directive citée ci-dessus)1. Elles sont remplacées par les batteries NiMH, elles-mêmes aujourd'hui concurrencées par les batteries Li-ion.
  - A<u>ccumulateurs industriels</u>
    La situation est quelque peu différente puisque ces accumulateurs conservent des avantages importants par rapport aux autres technologies disponibles. Ils sont en effet d'une grande fiabilité électrique (résistance à la surcharge) et mécanique (résistance aux chocs) et tolèrent une large plage de température (de -50°C à +70°C). De plus ils jouissent naturellement d'une longue durée de vie. C'est pour ces raisons qu'ils sont généralement retenus pour des applications de sécurité où ils contribuent à la protection des personnes et des biens dans des domaines d'utilisation exigeants. Les domaines principaux d'utilisation sont la sécurité aéronautique (la quasi totalité des avions commerciaux sont équipés de batteries de secours Ni-Cd), la sécurité ferroviaire (il en est de même pour les trains à grande vitesse), la fiabilité des réseaux d'accès difficiles (télécommunication, données et énergie).
  - Cependant, la présence de substances dangereuses (6 % de Cd) au sein de ces produits rend impératif que le détenteur confie les accumulateurs NiCd industriels usagés à un site de traitement autorisé pour assurer son recyclage conformément à la législation en vigueur. Le fabricant doit à cet égard apporter son conseil et proposer une solution (voir directive).
  - Dans le domaine industriel, cette technologie est parfois en concurrence avec la technologie plomb/acide (mêmes contraintes sur le produit usagé suite à la présence de substances dangereuses : 60 % de Pb) et la technologie Ni-MH (assez peu développée). D'autres technologies se développent pour des marchés très spécialisés (ex: militaire, médical, énergies renouvelables intermittentes...).

- **Batteries NI MH**
  Un accumulateur nickel-hydrure métallique ou NiMH (de l'anglais nickel-metal hydride) est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'hydrure métallique (composé permettant de stocker de l'hydrogène) et de l'oxyhydroxyde de nickel comme électrode.

Les accumulateurs NiMH ont été commercialisés vers 1990 et présentent une énergie volumique supérieure d'au moins 30 % par rapport aux accumulateurs NiCd (Nickel-Cadmium). Ils sont aujourd'hui eux-mêmes dépassés en termes d'énergie massique par les accumulateurs Li-ion (Lithium-ion) et Lithium-Polymère.

- **Batteries Lithium-ion**
  - Les principaux avantages sont une énergie massique élevée (deux à cinq fois plus que le Ni-MH par exemple) ainsi que l'absence d'effet mémoire. Enfin, l'auto-décharge est relativement faible par rapport à d'autres accumulateurs.
  - Cependant le coût reste important et cantonne le lithium aux systèmes de petite taille.
  - La recherche s'oriente vers des cathodes de batteries lithium-ion sans cobalt. http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/69960.htm

  Ces caractéristiques font de cette batterie l'une des meilleures solutions actuelles pour alimenter en électricité les appareils nomades (appareil photo, téléphone mobile) ou les véhicules (voiture hybride, voiture électrique).

- **Batteries Nickel et lithium**
  - Les batteries Li-Ion peut-être bientôt dépassées ?
    A l'heure actuelle, la majorité des batteries « grand public » commercialisées sont de type Li-ion. Ces accumulateurs ont en effet peu à peu remplacé les anciennes batteries Ni-Cd et Ni-MH. Le National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) japonais travaille toutefois – comme d'autres laboratoires dans le monde – sur une nouvelle technologie de batterie qui pourrait à terme remplacer les accumulateurs Li-ion.
  - La technologie Ni-Li (Nickel-Lithium) combinerait ainsi la grande capacité de stockage du Ni-MH avec la tension par élément du Li-Ion.
    Reste que cette technologie n'en est qu'à ses balbutiements, et qu'il devrait par conséquent s'écouler encore quelques années avant que les batteries Ni-Li n'inondent le marché. En espérant que les chercheurs parviennent à résoudre les problèmes subsistants
    http://www.presence-pc.com/actualite/batterie-Li-Ion-36696/

- **Batteries au plomb**

  Technologie la plus rudimentaire, elle est aussi la moins chère et reste donc encore largement utilisée, notamment pour assurer l'autonomie des systèmes électriques isolés du réseau.

- **Batteries à sodium-soufre**

  →1MW à La Réunion

  EDF a inauguré les 8 et 9 juillet 2010 sur l'île de La Réunion une batterie de stockage d'électricité de grande capacité, sans équivalent actuel en Europe. La batterie de stockage d'électricité installée sur la commune de Saint-André pèse 100 tonnes et affiche un rendement de 80%. Elle permet de restituer une puissance de 1 MW pendant 7 heures. Elle a nécessité un investissement de 3,5 millions d'euros. Son constructeur japonais NGK garantit une permanence de sa capacité pendant 15 ans.
  http://www.enerzine.com/14/10048+batterie-de-stockage-delectricite-1-mw-a-la-reunion+.html

  →Une batterie géante au Texas

  Le dispositif représente la première batterie Sodium-Soufre (NaS) au Texas et la plus importante du pays. Les habitants de la ville de Presidio l'ont déjà surnommé "BOB", une abréviation pour "Big Old Battery". La batterie géante d'une puissance

de 4 mégawatts peut fonctionner sans interruption pendant huit heures. Le système de batterie qui se compose de 80 modules de 3,6 tonnes chacun a également été construit par NGK. http://www.enerzine.com/15/9500+une-batterie-geante-au-sodium-de-4-mw-au-texas+.html

- **Batteries Fer-phosphate**
  La Chine est en train de construire la plus grande station de stockage d'énergie renouvelable au monde, implantée à Zhangbei dans la province d'Hebei. Le projet englobe la production d'énergie solaire et éolienne à hauteur de 140 MW et offre la possibilité de stocker 36 MWh de l'électricité produite sur place. La société de distribution d'énergie chinoise a choisi la technologie de batteries fer-phosphate de l'entreprise chinoise BYD en raison de leur durée de vie de près de 20 ans. L'investissement total pour l'ensemble du site se monte à 400 millions d'euros.
  http://outilssolaires.blog.ca/2012/06/19/5-les-batteries-rechargeables-13901655/

- **Une batterie liquide et économique**
  Un nouveau type de batterie fait aujourd'hui l'objet de recherches au Massachusetts Institute of Technology (MIT). Elle pourrait permettre de diviser le coût du stockage par deux, comparé aux batteries lithium-ion et ainsi contribuer au déploiement de l'énergie solaire, soumise aux variations d'ensoleillement. Contrairement à la plupart des accumulateurs actuels, les électrodes sont ici constituées de métaux fondus, Quant à l'électrolyte, il s'agit de sel fondu. Cette batterie permettra d'atteindre de fortes capacités de stockage. «Enfin, cette technologie se veut fortement compétitive grâce au recours à des matériaux à bas coût», précise Sophie de Richecour, chef du département Prospective scientifique et technologique chez Total, partenaire du projet. Plusieurs types d'alliage sont aujourd'hui testés pour réduire notamment la température de fonctionnement.
  Le premier prototype, pourrait être composé d'antimoine, pour la couche supérieure, et de magnésium, pour la couche inférieure. Cette technologie offrant une grande flexibilité, plusieurs types d'application stationnaire sont visés, de quelques kWh à plusieurs MWh (La Recherche, n° 457, Novembre 2011, p.85).

- **Batteries Redox flow**
  Avantages : Longue durée de vie, Découplage puissance et énergie, Stockage saisonnier possible.
  Inconvénients : Masse et encombrement important, Coût élevé, Fort taux d'auto-décharge en stand-by.
  Si l'électrolyte d'une batterie était liquide, il serait possible de la recharger rapidement. Ce procédé existe : ce sont les batteries à flux redox.

  →**En Allemagne** : pour les voitures électriques.
  Ces batteries sont basées sur des électrolytes liquides. Ils peuvent donc être rechargés à la station-service en quelques minutes : l'électrolyte déchargé est simplement pompé hors du réservoir et remplacé avec un liquide chargé, affirme Jens Noack, ingénieur à l'ICT. L'électrolyte pompé peut être rechargé en station-service, par exemple, grâce à une éolienne ou à une structure solaire. »
  Le principe de batteries à flux redox n'est pas nouveau. Ces batteries stockent l'électricité et la génèrent par une réaction d'oxydoréduction. Deux électrolytes liquides contiennent des ions métalliques dissous qui traversent un feutre de

graphite poreux où se trouvent les électrodes. Une membrane sépare les électrolytes et les électrodes mais permet l'échange de protons. Cet échange génère un courant qui, capté par les électrodes, peut être utilisé par une batterie pour faire fonctionner un dispositif.
http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/developpement-durable-1/d/des-batteries-redox-qui-se-rechargent-a-la-pompe_20862/

→**Au Japon** : Sumitomo Electric Industries teste un système de stockage d'électricité solaire CPV
Le groupe japonais, Sumitomo Electric Industries a annoncé, le 24 juillet 2012, la réalisation d'un système de génération et de stockage d'électricité (1 MW) sur les lieux de Yokohama Works, situés à 30 km au sud de Tokyo, au Japon.
Le système qui est entré en fonctionnement comprend un accumulateur 'redox-flow' et des unités photovoltaïques à concentration (CPV), les plus puissantes du Japon. La société a coopéré avec Nissin Electric, Sumitomo Densetsu et Meidensha Corporation pour la mise au point de ce système.
http://solisiblog.blogspot.fr/2012/07/japon-sumitomo-electric-industries.html

Les électrolyseurs

Dans un électrolyseur alcalin, on applique une tension de 1,5 à 2 volts (avec un système idéal 1 ,23 volt suffirait) entre deux électrodes, l'une de nickel, l'autre d'acier nickelé, plongées dans une solution très basique, car très concentrée en hydroxyde de potassium (Pour La Science, juillet 2011). On obtient alors le dihydrogène à la cathode et du dioxygène à l'anode.
Dans le domaine des débits intermédiaires, des systèmes allant jusqu'à 10 Nm3 /heure d'hydrogène sont commercialisés, par exemple pour le stockage des énergies renouvelables (Nm3=Normaux m3, volume à pression et température de référence). Grâce à un caisson de pressurisation, ils peuvent fonctionner jusqu'à 30 bar. Ils peuvent être connectés à des systèmes photovoltaïque ou éolien moyennant une gestion électrique adéquate. L'hydrogène produit peut être stocké (sous pression ou sous forme d'hydrures chimiques) ou transporté (réseau de canalisations) selon les sites et les applications souhaitées. On peut créer une station hydrogène automatisée avec un électrolyseur permettant la production de 2,5 m3/heure d'hydrogène, couplé à un réservoir à hydrure et à une pile à combustible H2/O2. L'ensemble constitue une station électrique autonome qui peut être également utilisée comme station d'hydrogène pour les applications mobiles.

Les piles à combustible (PAC)

- **Une pile à combustible est une pile qui fournit de l'électricité.**
  Elle réalise la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau, grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. La pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile hydrogène-oxygène ou hydrogène-air. Parmi les cinq différents types de pile à combustible, la

PEMFC (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell) ou pile à membrane échangeuse de protons présente des caractéristiques telles que cette technologie est actuellement retenue pour l'équipement des véhicules à traction électrique, les applications électroniques portables (micro-ordinateur, téléphone portable, …) et la cogénération de petite et moyenne puissance (alimentation de l'habitat individuel en chaleur et en électricité par exemple). Si l'usage de l'hydrogène parvient à s'imposer, le convertisseur énergétique qu'est la pile à combustible devient un objet extrêmement intéressant

- **Toutes dégagent de la chaleur.**
  Celle-ci peut être récupérée pour de la COGENERATION. L'exemple de la maison dégage 60 à 100°C qui peut servir au chauffage de l'eau. La pile à combustible est en fait un moyen de transformer un carburant en électricité. Elle n'est donc ni plus ni moins "propre" que le carburant utilisé (et la manière de le produire).
- **Certaines permettent le stockage d'électricité via l'électrolyse de l'eau.**
  Elles peuvent donc être un outil de stockage de l'énergie électrique. Une pile à combustible réversible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), selon les besoins, convertit l'électricité et l'eau en hydrogène et inversement. Depuis quelques années, la pile à combustible réversible à membrane échangeuse de protons offre une telle maîtrise à petite échelle.
  http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actualite-de-l-hydrogene-pour-stocker-les-energies-alternatives-24031.php
- **La pile à combustible est chère** de par la nécessité de catalyseurs à base de métaux précieux.
  Diminution de la quantité de platine et/ou nouveau catalyseur.
  - ✓ Des chercheurs du CEA, du CNRS et de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble et à Saclay, ont mis au point deux nouveaux matériaux à base de cobalt capables de remplacer le platine, métal rare et cher, dans la production d'hydrogène à partir d'eau (électrolyse) :
    http://www.cea.fr/recherche_fondamentale/du_cobalt_a_la_place_du_platine-95731
    Pour le cobalt réserves mondiales: 7 millions de tonnes de Cobalt
    Pour le platine, l'USGS a estimé à environ 80000 tonnes le stock mondial exploitable de platinoïdes.
    Le problème n'est pas seulement la rareté, c'est aussi celui du coût, le platine est plus cher que le cobalt. Mais il faut aussi prévoir un recyclage draconien des catalyseurs. Mais il ne faut pas oublier les dégâts que fait le Cobalt en Centrafrique, qui possède une bonne part des réserves
  - ✓ Les scientifiques de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) ont montré que le sulfure de molybdène amorphe est un catalyseur très efficace et abondant, donc bien moins cher.
  - ✓ Des chercheurs du Centre des Énergies, Matériaux, Télécommunications de l'Université INRS (Institut national de la recherche scientifique au Québec) ont développé un nouveau catalyseur moléculaire à base de fer modifié pour remplacer le platine dans les piles à combustible.
    http://bitchimie.imist.ma/spip.php?article53
- **Sa durée de vie est relativement faible** (moins de 50 000 km pour une voiture).
  Mais elle permettrait une évolution vers la décentralisation poussée du stockage et de la réutilisation, car elle est **adaptable en taille sans changer de rendement**.
  Voir ici : les piles à combustible

- Les PAC PEMFC, en vente actuellement et promises à un plus grand développement, sont adaptables à différentes échelles du portable à l'entreprise mais leurs rendements restent faibles de l'ordre de **55 %.** Elles sont **réversibles**, c'est-à-dire qu'elles assurent l'électrolyse de l'eau mais aussi l'utilisation de l'H_2 pour en faire de l'électricité.
- Elles ont un rendement final de 44% résultant du rendement de fabrication de l'hydrogène de 80 % puis de celui de la pile à combustibles de 55 % (55%x80%=44 %)
- Actuellement, seules les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC) peuvent utiliser le méthane et fournir jusqu'à 100MW d'électricité.
- Les piles à combustibles haute température comme les PAC SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) fonctionnant avec un mélange d'hydrogène H_2 et de monoxyde de carbone CO peuvent atteindre 80 % de rendement. (Voir Clefs CEA n°44)

Au-delà des ressources utilisables dès à présent, il faut tenir compte du développement des piles à combustible. De plus en plus d'entreprises proposent déjà à la vente des PAC. On en trouve dès à présent couvrant une large gamme de besoins électriques (de 100 Watts à 500 Kilowatts pour une PEMFC, ce qui intègre par exemple les besoins d'une famille (30 ampères). Il est nécessaire d'intégrer leur existence dans notre plan énergétique.

Le dihydrogène

L'électricité propre excédentaire peut être utilisée pour « casser » les molécules d'eau en dihydrogène (H2) et dioxygène (électrolyse de l'eau). L'H2 est une excellente forme de stockage d'électricité, mais son cycle production/stockage/utilisation n'est pas encore totalement maitrisé. L'H2 est donc une forme chimique de stockage de l'électricité mais on doit également trouver des moyens de le stocker et de le transporter.
Le dihydrogène intéresse fortement avec les réacteurs nucléaires de 4è génération, qui pourraient donner une production très importante et peu chère d'H2. C'est pour cela que les grands groupes s'intéressent au développement de toute la filière H2.

La production de l'H2
L'hydrogène dont il est question ici est celui obtenu par hydrolyse de l'eau à partir de l'électricité de source renouvelable en excès. Mais il faut savoir qu'il existe d'autres sources d'H_2 également renouvelable (Solaire thermique centralisé, à partir de la biomasse, à partir d'éthanol, biohydrogène grâce à des bactéries ou des microalgues).

Electrolyse de l'eau donne H_2 : $4H_2O \dashrightarrow 4H_2+2O_2$

Le rendement énergétique est de **80% environ**.
La production locale par voie électrolytique sur des systèmes de petite capacité est une voie qui doit être examinée, car il ne faut pas oublier qu'un litre d'eau contient suffisamment d'hydrogène pour produire 2 kWh d'électricité, via une pile à combustible présentant un rendement de 45%.
http://www.afh2.org/uploads/memento/pdf/fiche_3_2_1.pdf

Le stockage de l'H_2

Cet hydrogène pourra être stocké de diverses manières : (source AFH2)

- Soit sous forme liquide cryogénique mais au détriment de la quantité d'hydrogène qui restera disponible puisque la liquéfaction de l'hydrogène est très énergivore : plus d'un tiers de l'hydrogène produit servira à fournir cette énergie de liquéfaction,
- Soit sous forme gazeuse sous pression, par exemple stocké à 100 bars puis comprimé à 800 bars avant de servir au remplissage d'un réservoir de voiture à 700 bars sachant que cette opération va consommer (énergie à fournir au compresseur) environ 20% de l'hydrogène stocké,
- Soit sous forme gazeuse, mélangé à du gaz naturel (mélange « hythane »).
- Soit sous forme gazeuse dans un réservoir d'hydrures qui devra être réchauffé au moment de la désorption avant d'être comprimé avant livraison, comme dans le cas précédent.

Une équipe d'ingénieurs, à La Motte-Fanjas (Drome), a créé une startup, McPhy, qui produit des pastilles de 30 cm d'hydrure de magnésium dans lesquelles sont stockés 600 litres d'H_2 : http://www.mcphy.com/fr/produits/stockage-hydrogene-solide/

Exemples de ce qui existe et qu'on pourrait développer :

1 - Le 9 janvier dernier, au Centre de Recherches Scientifiques Georges Peri de l'Université de Corse, a été inaugurée la plateforme MYRTE (Mission hYdrogène Renouvelable pour l'inTégration au réseau Electrique). Fruit d'une collaboration entre l'Université de Corse, le CEA et l'entreprise Hélion, ce projet a pour objectif de tester en vraie grandeur une installation unique en son genre, permettant de capter de l'énergie solaire et de la stocker sous la forme d'hydrogène afin de la réinjecter dans le réseau électrique quand celui-ci est demandeur. Pour ce faire, 3 700 m2 de panneaux solaires ont été installés sur ce site corse. L'électricité ainsi produite par ces panneaux est alors injectée dans un électrolyseur à eau qui va séparer l'oxygène et l'hydrogène. Stocké, l'hydrogène est ensuite envoyé vers une pile à combustible quand le réseau nécessite un supplément d'électricité.
http://energie.eelv.fr/technologie-comment-stocker-de-lelectricite/

2 - La chancelière allemande Angela Merkel a posé le 21 avril 2009 à Prenzlau dans le Brandebourg la première pierre pour la construction de la première centrale hybride industrielle au monde. Cette technologie est une avancée importante pour la filière de l'énergie, puisqu'elle permet le stockage de l'électricité éolienne et son injection dans le réseau au rythme des besoins.
La centrale hybride a été inaugurée le 25 octobre 2011
https://www.enertrag.com/fr/developpement-de-projet/la-centrale-hybride.html

Leur développement devra suivre les avancées en matière de rendement d'électrolyse, de stockage sécurisé et de catalyse.

Les dérivés de l'H2

Le méthane

L'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau peut, si on ne veut ou peut pas le stocker, donner du méthane par méthanation.

Méthanation : $CO_2+4H_2 \text{--->} CH_4+2H_2O$

Rendement de **40%.**
http://www.naturavox.fr/energies/article/la-methanation-une-strategie

Utilisation du méthane (oxydation) : $CH_4+2O_2 \text{--->} CO_2+2H_2O$
Réaction exoénergétique : ΔH = -891 kJ·mol-1

- Le rendement des deux opérations d'électrolyse (rendement de 80%) et de méthanation (rendement de 40%) est d'environ **32%**.
- Se pose bien sûr le problème de l'origine du CO_2 dans la réaction de méthanation, sachant que le CO_2 absorbé sera rejeté par l'oxydation du méthane.
- Ensuite ce méthane rejoint le réseau général. Il n'est pas en circuit fermé exclusivement électrique, mais il participe à redonner en partie de l'électricité dans des centrales combinées à gaz. Les centrales à gaz en cogénération donnent électricité et chaleur et le gaz utilisé sera un mélange du biométhane de méthanisation et du biométhane de méthanation avec pendant la transition du gaz d'origine fossile. L'Allemagne (source negaWatt) développe actuellement cette technique, réaction de l'H2 (obtenu par électrolyse de l'eau) avec du CO2 (origine non fossile) donnant du méthane que l'on sait stocker et utiliser tel quel dans les circuits actuels du gaz naturel. Il suffirait donc de créer des unités de méthanation, décentralisées selon les capacités de stockage et des besoins en électricité.
http://www.naturavox.fr/energies/article/la-methanation-une-strategie

L'ammoniac

La production se fait par synthèse directe à partir du dihydrogène venant de l'électrolyse et de diazote (procédé Haber-Bosch). Le diazote est fourni par l'air. La combustion catalysée dans une centrale électrique thermique permet de récupérer de l'électricité.

L'acide formique

http://actu.epfl.ch/news/de-l-acide-formique-dans-le-moteur-3/

Des hydrocarbures

Le procédé Fischer-Tropsch est un procédé chimique où intervient la catalyse de monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbures. Les catalyseurs les plus courants sont le fer, le cobalt ou le ruthénium, ainsi que le nickel, mais ce dernier aura tendance à former du méthane (cf méthanation). L'intérêt de la conversion est de produire du pétrole brut de synthèse. C'est un procédé très performant en termes de rendement, mais qui nécessite des investissements très lourds.

$$(2n+1)H_2+nCO \rightarrow C_nH_{2n+2}+nH_2O$$

Se pose ici le problème de l'origine du CO.