



Combinaisons, transformations et appropriations

Culture de l'innovation ETN 204 – Claudie DAMADE

*Notre politique énergétique est trop sérieuse pour que l'on délègue les décisions
qui la concernent aux seuls industriels...*

Contenu

Naissance.....	1
Pitch.....	2
Dream Team	3
Dynamique	5
Phase préalable - compréhension.....	5
Phase d'expansion, de rêve d'idéal.....	5
Phase combinatoire, de sélection de pistes.....	5
Phase de validation, construction de prototypes	5
Phase d'industrialisation, test en grandeur réelle	6
Analyse multidimensionnelle	6
Scientifique et Technologique.....	6
L'hydrogène comme source d'énergie.....	6
Climat, ressource naturelle et durabilité.....	10
Création de valeur	12
Eléments de la synthèse créative	14
Références.....	14

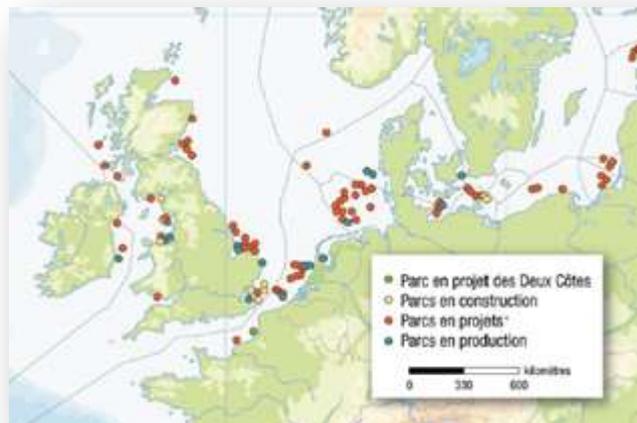
Naissance

La science nous dit que l'étoile filante est avant tout le signe de la mort d'un astre, la rencontre de sa matière résiduelle avec l'atmosphère terrestre où elle viendra s'abimer dans un dernier éclat. Dernier scintillement de la matière, ultime vibration du chant du cygne, dernier souffle d'un vent arrivant tout droit du passé, elles ont toutefois le goût de la magie et de l'enchantement ces étoiles qui naissent à notre vue en mourant.

Les étoiles filantes... un clin d'œil aux antagonistes de ce projet qui se rencontrèrent en août 2010 à l'occasion d'une nuit d'observation des étoiles filantes et qui entre deux « oh celle-là était belle ! » se racontèrent leur intérêt pour la science, leur passion des projets, échangèrent leurs visions de l'entreprise et tombèrent d'accord sur l'importance vitale de l'humain en tous domaines « ouah celle-ci a traversé tout le ciel ! »

Pitch

Inspiré par les projets de génération d'énergie nucléaires et éoliens des régions Picarde et Normande et par la façon dont ont été menés les débats publics pour chaque projet en 2010, notre projet de stimulation de l'innovation et d'appropriation des solutions découle directement de trois observations :



- ★ Lors du débat public organisé sur l'implantation de la centrale EPR de Penly en avril 2010, aucune référence n'est faite au projet de parc éolien des deux côtes dont le débat public démarre au même moment à quelques dizaines de kilomètres de Penly. Le débat public concernant le projet de parc éolien des deux côtes (Picarde et Normande) quant à lui va même jusqu'à s'appuyer sur ses différences avec le projet d'EPR pour valoriser ses avantages et provoquer l'adhésion du public.
- ★ Dans les deux cas, les acteurs cherchent à démontrer que leur projet est le meilleur, le plus viable, le plus sécuritaire ou le plus rentable. Ils se positionnent en concurrence avec les autres projets et montrent qu'aucune concertation n'a été menée entre les deux filaires. Qui plus est, dans les deux cas, l'expression des besoins énergétiques restent globale et aucune autre hypothèse que le raccordement au réseau ErDF n'est évoquée.
- ★ Il existe une source d'énergie qui n'émet pas de CO₂ et qui pourrait permettre de réduire d'un tiers les émissions de CO₂ en France. Cette énergie peut être produite par différents procédés, deux de ces procédés sont intimement liés à la proximité d'une source d'électricité à un prix modéré. L'éolien et le nucléaire sont des partenaires ciblés pour sa production. Il s'agit de l'hydrogène. Or à aucun moment son nom n'a été prononcé lors des débats publics menés en 2010 sur les projets d'EPR et d'éolien off-shore picards et normands.

Rappel des objectifs de développement de la production électrique à partir d'énergies renouvelables en France :

- I. Pour la biomasse, en termes de puissance supplémentaire à mettre en service :
520 MW entre décembre 2009 et décembre 2012 ;
2 300 MW entre décembre 2009 et décembre 2020.
- II. Pour l'énergie radiative du soleil, en termes de puissance totale installée :
1 100 MW au 31 décembre 2012 ;
5 400 MW au 31 décembre 2020.
- III. Pour les énergies éolienne et marines, en termes de puissance totale installée :
11 500 MW au 31 décembre 2012, dont 10 500 à partir de l'énergie éolienne à terre et 1 000 MW à partir de l'énergie éolienne en mer et des autres énergies marines ;
25 000 MW au 31 décembre 2020, dont 19 000 à partir de l'énergie éolienne à terre et 6 000 MW à partir de l'énergie éolienne en mer et des autres énergies marines.

Or si la biomasse est stockable, nous savons que les énergies éoliennes et solaires ne le sont pas et ne permettent donc pas de pallier aux pics de consommation ni aux risques de black-out. Elles ne permettent pas de se substituer à la construction et à la maintenance de centrales thermiques, coûteuses lorsqu'elles sont à l'arrêt -puisqu'elles constituent un investissement non rentabilisé nécessitant des actions de maintenance opérationnelles - et émettrices de CO₂ lorsqu'elles fonctionnent. On peut donc s'interroger sur l'intérêt à construire ses fermes éoliennes et solaires pour les connecter simplement au réseau ErDF.

Par ailleurs, l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie dans le secteur des transports serait l'une des solutions les plus efficaces en terme de réduction de l'emprunte environnementale, ceci pour trois raisons :

- Le secteur des transports représente 33% des émissions de CO₂ en France.
- Il s'agit du seul secteur qui n'ait pas inversé sa tendance en termes d'émissions depuis la signature du protocole de Kyoto en 1997.
- Son empreinte ne concerne pas que les émissions de CO₂ mais aussi des rejets polluants qui ont un effet néfaste sur la santé.

En regard de cela, la combustion de l'hydrogène ne génère que de l'eau.

Enfin la production d'hydrogène n'a pas trouvé à ce jour son seuil de rentabilité en grande partie du fait qu'elle nécessite de l'électricité pour sa production et son stockage. L'hydrogène atteint un coût de revient identique à celui de l'essence avec un prix de l'électricité autour 45€/MW.

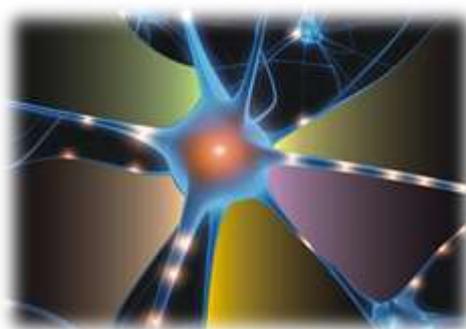
Alors certes, prises indépendamment les énergies éoliennes et solaires ne sont pas idéales dans la mesure où elles ne résolvent pas tous les problèmes auxquels nous devons faire face. Par contre si elles contribuent, chacune dans leurs régions de prédilection, à rendre l'énergie stockable et à transformer durablement le secteur du transport et ses impacts sur l'environnement et la santé, alors cela mérite sans doute une approche plus globale, prenant en compte des objectifs à plus long terme, assumant l'impact des choix du passé en acceptant leur reconfiguration à la lumière des objectifs à venir.

Dream Team

L'objectif du projet peut sembler extrêmement ambitieux dans la mesure où il touche à l'énergie, un sujet que l'on imagine souvent inaccessible à nos esprits tant nous sommes habitués à le voir traité comme le terrain de jeu des multinationales et des ex-monopoles d'état. Mais à la question : « qui est concerné par l'énergie ? » on se demande comment répondre autre chose que « qui ne l'est pas ? ».

Les acteurs décrits ci-dessous ne constituent pas une liste limitative des groupes devant être impliqués dans un projet d'énergie nouvelle mais plutôt une liste des groupes devant absolument interagir entre eux pour qu'un tel projet soit innovant, c'est-à-dire qu'il crée

- des combinaisons entre les moyens imaginés par chaque groupe,
- des transformations des enjeux de chacun pour atteindre des objectifs plus ambitieux



- et finalement une appropriation des solutions adoptées pour assurer leur longévité et la pérennité des choix.

Dans le cas qui interesse les régions Picardes et Normandes, les acteurs des filiales énergétiques ont été choisis pour leur adéquation à l'environnement maritime et au climat. Ils sont le mix indispensable à une réflexion sur les combinaisons possibles et à leurs implications.

- les représentants des filiales énergétiques
 - éoliennes off-shore,
 - hydrogène énergie
 - nucléaires
- Les centres de recherche et université développant des programmes liés à l'hydrogène Energie
 - Production H par électrolyse de l'eau
CEA centre de Fontenay aux roses
Centre de compétence hydrogène (Berlin)
 - Production H par électrolyse haute température
CEA - centre de Fontenay aux roses
 - Stockage de l'hydrogène
CEA - centre de Fontenay aux roses
 - Fragilisation des métaux induite par l'hydrogène
Institut Fraunhofer de mécanique des matériaux IWM de Fribourg
- La filiaire H industrielle
 - Unités production d'hydrogène par électrolyse
Hydro Electrolyser AS
 - Stockage
Air liquide
Hydro
- Filiaire du transport
 - Constructeurs automobiles
PSA
BMW
 - Equipementiers
 - Constructeurs de poids lourd
 - Motoristes
Routiers
Navals
 - Fabricants de réservoirs
Air liquide
Inergy Automotive
 - Réseaux de distribution de carburant
- Centres de recherche
 - Ressource maritimes et énergie
IFREMER
 - Recherche / observatoire des mouvements migratoires des oiseaux
- Représentants d'activités utilisant les mêmes ressources
Pêche
Tourisme
Eleveurs / cueilleurs de coquillages
Chasseurs
Agriculateurs
Eleveurs
Industriels
Parc naturel du Marquenterre

Dynamique

Phase préalable - compréhension

Parce que le hasard peut fournir une brique, mais ne construira pas un mur... La condition de départ au dialogue est la compréhension.

Dès lors qu'on doit aborder des sujets scientifiques nécessitant un minimum d'explications pour être appréhendés par le plus grand nombre, chaque filaire technologique doit exposer à l'ensemble des autres acteurs les bases de la science qu'elle étudie, les pistes de recherche qu'elle explore et les objectifs qu'elle vise.

Travail de vulgarisation – le terme est impropre – on devrait dire exercice de mise à portée d'autrui, de partage, de mise à disposition indispensable à la collaboration. Il s'effectue par tous moyens : Presse, blogs, sites collaboratifs, vidéo, conférences, animations, jeux, représentation théâtrales...

Phase d'expansion, de rêve d'idéal

L'homme n'a jamais rien réalisé qu'il n'ait d'abord imaginé. L'efficacité humaine naît du sentiment de maîtrise de son environnement et de l'impact déterministe qu'il a sur son futur.

Dans la phase d'expansion chaque groupe d'acteurs doit pouvoir exprimer son rêve d'idéal, soit par ses moyens propres en communiquant de façon directe avec les autres intervenants, soit par le biais de spécialistes de la représentation artistique ou philosophique.

Objectif : Faire découvrir aux autres acteurs du projet la réalité, le vécu de son métier, de sa passion ou de son secteur d'activité, dans tous ses aspects positifs et négatifs et faire apprécier le meilleur de ce qui existe aujourd'hui.

Mise en commun, débats discussions autour de « ce que pourrait être la vision partagée du futur »

Objectif : Co-construire un idéal commun, fédérer les groupes autour d'une vision commune de l'avenir.

Phase combinatoire, de sélection de pistes

Nous vivons dans un environnement contraignant qui nous pousse à nous surpasser et à trouver ensembles de nouvelles pistes d'exploration et de nouveaux modes de fonctionnement.

Cette phase, si elle a été correctement préparée lors des étapes précédentes est celle où la productivité du groupe est maximale où les évidences s'imposent d'elles-mêmes. La cohérence s'installe à mesure que les objectifs, les contraintes et les désirs de chaque individu s'imbriquent, se compensent et se complètent. Le projet prend du sens, se conceptualise et les acteurs sont dans une phase de motivation optimale.

Deux objectifs à ce stade :

La sélection des pistes à valider – Choix des études complémentaires à mener et des prototypes à construire pour valider les concepts définis.

L'appropriation du projet – A partir de maintenant tout ce qui sera fait sur le projet appartient au groupe impliqué jusqu'à ce stade.

Phase de validation, construction de prototypes

Un concept n'a de valeur que s'il montre son efficacité à répondre à des préoccupations humaines du monde réel.

La phase de validation n'est pas l'affaire des seuls spécialistes mais elle requiert des personnes pointues dans la maîtrise de leur art afin d'assurer au projet la mise en œuvre des meilleures technologies disponibles et matures.

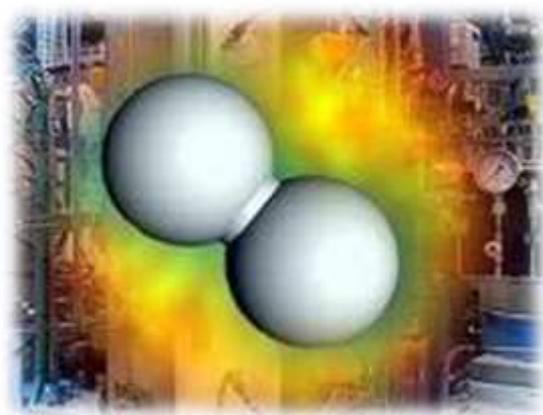
L'objectif est la validation des concepts imaginés, cette phase est déterminante dans la poursuite du projet. Elle est préalable aux phases d'investissement futures et doit être documentée avec soin pour permettre de supporter l'argumentation quant aux décisions de poursuivre, d'abandonner ou de réorienter les concepts testés.

Phase d'industrialisation, test en grandeur réelle

Plus notre projet est ambitieux, plus il justifie la recherche des meilleurs spécialistes de l'état de l'art pour sa mise en œuvre.

La phase d'industrialisation est celle des spécialistes. Le groupe projet intervient à ce stade pour surveiller l'adéquation du déploiement du projet au cahier des charges initial. Sa posture est à mi-chemin entre celle du client et à celle de l'actionnaire. Le groupe projet n'est plus le public à qui un consortium industriel vient vendre un projet comme dans le cas d'une démarche cndp¹, il est le donneur d'ordre qui sous-traite son ouvrage à des industriels compétents et spécialisés.

Analyse multidimensionnelle



Scientifique et Technologique

L'hydrogène comme source d'énergie

« L'hydrogène est le carburant le plus propre que nous puissions imaginer » nous dit le microbiologiste Wim Vermaas, professeur à l'ASU's School of Life Sciences et qui dirige les investigations sur un projet de bio-hydrogène² au sien de l'Arizona State University. « Il génère de l'énergie sans relâcher de CO₂ dans l'atmosphère. C'est la technologie ultime en

matière d'énergie propre parce que vous cassez des molécules d'eau pour faire de l'hydrogène et si vous brûlez l'hydrogène pour utiliser l'énergie, vous avez à nouveau de l'eau ». Il ne nous reste plus qu'à produire l'hydrogène à partir de l'énergie solaire, éolienne, de la biomasse, du CO₂ généré pas les énergies fossiles ou d'un combiné de tout cela.

Les usages

Coté transport, tandis que l'attention se focalise tour à tour sur les bio-carburants et sur la voiture électrique, la recherche-développement sur la voiture à hydrogène progresse. La majorité des investigations dans ce domaine concerne la pile à combustible (PAC), qui consomme de l'hydrogène en produisant de l'électricité. Cette solution a l'avantage de ne rejeter que de la vapeur d'eau. La PAC pourrait remplacer la batterie ions-lithium des voitures électriques en s'affranchissant de ses inconvénients majeurs : faible autonomie et long temps de recharge. Une solution efficace mais encore coûteuse notamment au niveau du catalyseur qui utilise du platine, métal rare et précieux.

Une autre technologie, utilise l'hydrogène comme un vulgaire combustible dans un moteur à explosion. L'hydrogène a un pouvoir explosif très supérieur à celui de l'essence, d'ailleurs la propulsion spatiale, bien que quantitativement limitée, constitue une première utilisation industrielle de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique. Il s'agit du carburant du lanceur Ariane 5.

Pour les véhicules terrestres les spécialistes travaillent à s'affranchir de trois inconvénients majeurs :

- ★ Le stockage de l'hydrogène.

¹ Commission Nationale de Débat Public

² Utilisant des bactéries et l'énergie solaire pour la photosynthèse

- BMW a utilisé de l'hydrogène liquide, à une température de -253°C , dans un réservoir formé de deux coques d'acier séparées par du vide, 25% de l'énergie de l'hydrogène est consommé pour la liquéfaction.
- Le CEA et PSA ont testé le stockage d'hydrogène comprimé à 700 bars dans le cadre du projet européen StorHy. Le réservoir utilise une coque en fibre de carbone, et un « liner » en polymère qui assure l'étanchéité. Un tel réservoir de 150 litres assurerait une autonomie de 700 km. Dans ce cas, seulement 10% de l'énergie est consommée à la compression.

★ Le réseau de distribution.

Coté véhicule la distribution de l'hydrogène ne serait pas très différente de celle du GPL.

★ La gestion des risques inhérents à l'hydrogène.

Lorsqu'on pense hydrogène + risque, on imagine souvent l'explosion d'un réservoir. Toutefois il semble que ce risque-là puisse être facilement réduit grâce à des technologies de matériaux composites satisfaisant aux trois principaux critères requis :

- La durée de vie, 15 000 cycles de remplissage (20-875 bars) sans perte notable de propriétés (norme en vigueur)
- L'étanchéité, taux de fuite au minimum 20 fois inférieur à la valeur demandée par la norme ($1\text{cm}^3/\text{L/h}$)
- Et la résistance à la pression : les réservoirs ont démontré leur résistance à des pressions internes supérieures à la pression d'éclatement fixée par la norme (1645 bars, près de 2,5 fois la pression de service). Un tel réservoir de 150 litres assurerait une autonomie de 700 km et pourrait être produit d'ici 3 ans autour de 300€.

Il existe donc un risque plus insidieux que celui de l'explosion du réservoir. L'hydrogène, qui est un élément chimique très léger imprègne les matériaux de base dont le véhicule est constitué, non seulement lors du remplissage du réservoir, mais aussi lors des différents process de fabrication.

Pour les métaux comme l'acier, l'aluminium et le magnésium - qui sont couramment utilisés dans l'automobile et dans les technologies de l'énergie - l'hydrogène est un fragilisant : la ductilité du métal est fortement réduite en présence d'hydrogène, sa durabilité se détériore. Cela peut conduire à la rupture soudaine de pièces et de composants – au-delà du réservoir des éléments ordinaires comme des roulements pourraient également être affectés.

Les chercheurs de l'Institut Fraunhofer de mécanique des matériaux IWM à Fribourg étudient le processus de fragilisation induite par l'hydrogène. Leur objectif : trouver des matériaux et des procédés de fabrication qui sont compatibles avec l'hydrogène. "Grâce à notre nouveau laboratoire dédié, nous étudions comment et à quelle vitesse l'hydrogène migre à travers le métal. Nous sommes en mesure de détecter les points où l'élément H s'accumule dans le matériel" commente Nicholas Winzer, chercheur à l'IWM.

La production

Il existe de nombreuses filaires de production de l'hydrogène. Nous oublions ici les plus traditionnelles, par décomposition chimiques de produits carbonés, qui présente l'inconvénient de rejeter du CO₂, pour faire place aux plus innovantes.

Production d'hydrogène par fermentation ou photo-fermentation

La production de dihydrogène par fermentation est la conversion de substrat organique en «biohydrogène» par divers groupes de bactéries utilisant plusieurs systèmes d'enzyme, impliquant trois étapes semblables à la digestion anaérobie. Les réactions de fermentation en obscurité ne nécessitent pas l'énergie de la lumière, de sorte qu'elles sont capables de produire constamment l'hydrogène à partir de composés organiques jour et nuit. La photo-fermentation quant à elle, ne se produit que sous la lumière. Un exemple la photo-fermentation : les Rhodobacter sphaeroides SH2C sont employées pour convertir de petites molécules d'acides gras en hydrogène. L'Électrohydrogénèse est utilisée dans pile à combustible microbiennes.

Production biologique d'hydrogène par des algues ou de la biomasse

Le biohydrogène peut être produit dans un bioréacteur à algues. À la fin des années 1990, il a été découvert que si l'algue est privée de soufre, elle passe de la production d'oxygène, c'est-à-dire la photosynthèse normale, à la production de dihydrogène. Il est possible de produire le biohydrogène dans des bioréacteurs qui utilisent des matières premières autres que les algues, la source la plus commune étant les eaux usées. Le processus implique des bactéries consommant des hydrocarbures et rejetant de l'hydrogène et du CO₂, le CO₂ est ensuite retiré. Un prototype de bioréacteur à hydrogène utilisant des déchets comme matière première est opérationnel à l'usine de jus de raisin Welch, dans le nord-est de la Pennsylvanie.

La production d'hydrogène par électrolyse

Avec une alimentation en énergie électrique renouvelable, comme l'hydroélectricité, les éoliennes, ou des cellules photovoltaïques, l'électrolyse de l'eau permet de produire l'hydrogène sans pollution ou presque. Si cette méthode n'a pas été largement utilisée dans le passé c'est qu'en général, l'électricité consommée est plus précieuse que le dihydrogène produit, mais l'importance de l'électrolyse accroît à mesure que la population humaine et la pollution augmentent, que des ressources non renouvelables (composés de carbone) se réduisent et que les gouvernements suppriment les subventions des carburants à base de carbone.

Des chercheurs de General Electric ont mis au point un prototype de production d'hydrogène par électrolyse en réduisant considérablement les prix de revient. L'innovation principale tient à la structure de la cellule, conçue dans un plastique « maison » (le Noryl) résistant à l'électrolyte alcalin. Les électrodes sont matérialisées par des films métalliques minces appliqués sur le squelette plastique. Actuellement, le coût élevé de la cellule d'électrolyse est un frein à l'abaissement des coûts de production de l'hydrogène dans les installations fixes destinées à alimenter les postes de distribution de l'hydrogène.

Ce programme s'inscrit dans le cadre de la New York State Highway Initiative qui a reçu 2 millions de dollars du congrès fédéral au cours de l'année fiscale passée.

Fractionnement photoélectrochimique de l'eau

Utiliser l'électricité produite par des systèmes photovoltaïques offre la façon la plus propre de produire de l'hydrogène. L'eau est séparée en dihydrogène et dioxygène par électrolyse dans une cellule photoélectrochimique (PEC), un procédé également nommé « photosynthèse artificielle ». La recherche visant à l'élaboration d'efficacité supérieure multijonction de la technologie des piles est en cours par l'industrie photovoltaïque.

Électrolyse à haute température

Lorsque l'approvisionnement en énergie est sous forme de chaleur (solaire thermique, ou nucléaire), la meilleure voie de production du dihydrogène est l'électrolyse par haute température (HTE). Contrairement à l'électrolyse à basse température, la HTE convertit plus d'énergie-chaleur initiale en énergie chimique (le dihydrogène), pouvant en augmenter l'efficacité d'environ 50%. Parce qu'une partie de l'énergie en HTE est fournie sous forme de chaleur, moins d'énergie doit être convertie à deux reprises (de la chaleur à l'électricité, et ensuite sous forme chimique), ainsi il y a moins de pertes d'énergie.

En général, on ne s'intéresse au procédé HTE que lorsqu'une source de chaleur nucléaire est disponible, parce que l'autre forme de haute température non-chimique (la concentration solaire thermique) n'est pas suffisante pour faire baisser les coûts d'investissement de l'équipement HTE. La recherche en HTE et les réacteurs nucléaires à haute température peut aboutir à un approvisionnement en hydrogène qui est compétitif en termes de coûts au gaz naturel avec réduction de la vapeur (le vaporeformage). L'HTE a été démontrée en laboratoire, mais pas à une échelle industrielle.

Certains prototypes de réacteurs de quatrième génération³ fonctionnent de 850 à 1000 degrés Celsius, température considérablement plus élevée que celle des centrales nucléaires existantes. Un avantage d'un réacteur nucléaire qui produit à la fois électricité et hydrogène est qu'il peut moduler la production entre les deux. Par exemple, l'usine pourrait produire de l'électricité pendant la journée et de l'hydrogène la nuit, adaptant ainsi sa production électrique constante à la variation quotidienne de la demande.

Autres méthodes

La recherche en nanotechnologie sur la photosynthèse peut conduire à une plus grande efficacité de production solaire d'hydrogène, telle la cellule photo électrochimique, ou cellule à photolyse : C'est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photon), décompose l'eau en oxygène et hydrogène. On peut ensuite utiliser cet hydrogène dans des piles à combustible ou des moteurs à hydrogène. Une telle cellule photo électrochimique est formée d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans de l'eau. Ce procédé de photolyse présente l'avantage sur la filière photovoltaïque de supprimer la nécessité de transport du courant électrique entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production de l'hydrogène par hydrolyse (la conversion directe apportant en outre un rendement supérieur). Toutefois la corrosion limite actuellement la durée de vie de ces composants en deçà du seuil de rentabilité, une limite qui pourrait bien être repoussée quand les chercheurs de l'Institut Fraunhofer de mécanique des matériaux IWM de Fribourg arriveront à leurs fins.

³ L'EPR est un réacteur de génération III



Climat, ressource naturelle et durabilité

Productions / Consommations énergétiques

Etat des lieux

Le Grenelle de l'environnement nous rappelle la réalité incontestable du changement climatique et de ses impacts :

→ + 1 et 6°C l'élévation de la température

moyenne terrestre, associée à un changement climatique d'ici la fin du siècle.

Les objectifs

L'objectif premier est de permettre aux générations futures de disposer des ressources dont elles auront besoin pour leur développement. Le groupe de travail estime que dans ce contexte, la France doit se placer dès maintenant sur la trajectoire d'une division par quatre de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, ce qui suppose d'imaginer un modèle de développement totalement différent de celui que nous connaissions jusqu'à présent.

Puisque le changement climatique est un problème global, les politiques devraient être conçues dans un cadre non seulement national mais aussi international. La promotion et le partage de la technologie ainsi que les mécanismes de marché sont importants, non seulement sur l'efficacité, mais aussi pour inciter et impliquer les pays émergents. L'adoption par tous les pays riches de la trajectoire d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, comme la France, laisserait leur place aux pays en développement.

« 3x20 » à l'horizon 2020 sont fixées par le Conseil européen :

- Réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre
- Baisse de 20 % de la consommation d'énergie
- 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie

Les enjeux

Pourquoi s'intéresser en priorité au secteur du transport ?

Pour deux raisons,

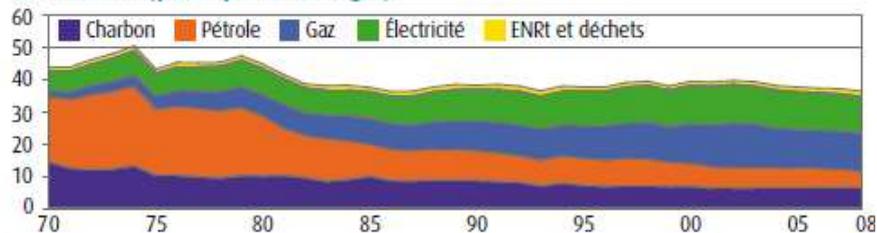
Si l'on regarde le mix énergétique Français par secteur d'activité – voir [figure 1](#) - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** on s'aperçoit que certains secteurs tels que l'industrie et le résidentiel tertiaire sont assez bien diversifiés, même si l'industrie reste en retrait en terme d'utilisation des énergies renouvelables, ce qui est loin d'être le cas pour le secteur des transports qui utilise quasi exclusivement les énergies dérivées du pétrole. On peut également assimiler techniquement la partie majoritairement utilisatrice du pétrole dans l'agriculture à des usages de transport et d'alimentation de véhicules motorisés.

- Maintenant si l'on s'intéresse aux émissions de CO₂ dans l'air par secteur d'activité, on s'aperçoit que tous les secteurs d'activités : transformation de l'énergie, industrie, résidentiel tertiaire ont fait des efforts plus ou moins efficaces pour réduire leur impact sur l'environnement et le climat à l'exception du secteur des transports qui a poursuivi l'expansion de ses rejets.

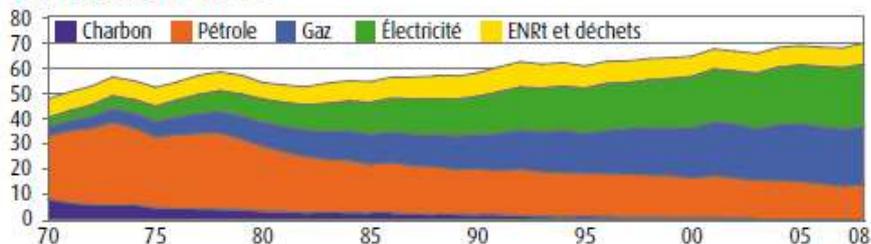
Consommation d'énergie finale par secteur et par énergie

Millions de tep

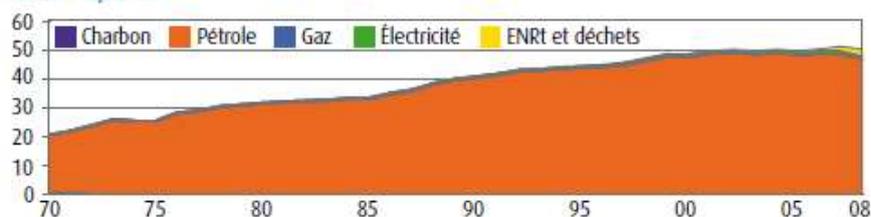
1. Industrie (y compris sidérurgie)



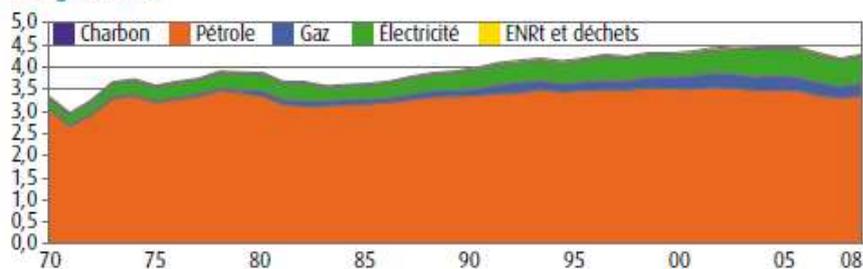
2. Résidentiel-tertiaire



3. Transports

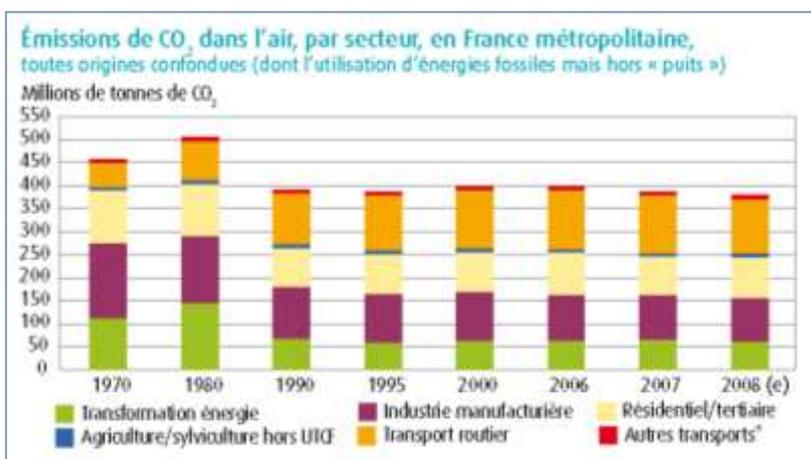


4. Agriculture



Source : SOeS, bilan de l'énergie.

Figure 1



★ Il semble donc que le secteur des transports soit à la fois le plus verrouillé sur ses modes de fonctionnement et le plus urgent à faire évoluer vers des techniques prenant en compte de façon plus globale, humaine et durable les critères de valeur des objets qu'il produit.

Les moyens

Nous devons aujourd'hui faire face à un problème complexe à la conjonction de deux contraintes fortes : la raréfaction des produits pétroliers et la nécessité de réduction de l'impact de l'humain sur le climat. Nous savons d'ores et déjà qu'aucune énergie à elle-seule ne saura remplacer nos énergies actuelles tout en intégrant les nouvelles contraintes environnementales.

La solution miraculeuse n'existe donc pas mais l'avenir réside dans une combinaison de moyens dont la coordination reste à inventer, pour peu que les acteurs en présence : producteurs, utilisateurs, chercheurs, métiers connexes aux environnements impliqués s'approprient la responsabilité de l'enjeu et la légitimité du projet.



Création de valeur

L'exemple de l'île norvégienne d'Utsira.

Un projet pilote mettant en œuvre les deux technologies de l'éolien et du stockage d'énergie sous forme d'hydrogène a été développé sur l'île d'Utsira, au sud-ouest de la côte Norvégienne. L'île est située à 18 km de la côte et abrite 230 habitants, elle est historiquement reliée à la terre ferme par un câble d'alimentation électrique sous-marin qui est devenu obsolète depuis que le projet de génération électrique éolienne-hydrogène y a été développé, au départ à l'initiative de deux insulaires travaillant pour une société maîtrisant les technologies de production et de stockage d'énergie - Hydro.

- * Utsira est suffisamment ventée pour être autosuffisante en énergie grâce à l'éolien... et au stockage d'énergie.
- * L'excédent d'énergie éolienne est transformé en hydrogène via un procédé d'électrolyse, comprimé et stocké.
- * Lorsque le vent faiblit ou cesse, l'électricité est produite à partir de l'hydrogène stocké grâce à un moteur à combustion d'hydrogène.

Les études de rentabilité exposées au public dans le cadre des cndp dans les deux exemples concernant les régions Picardes et Normandes

Nous rapportons ici quasiment mot pour mot les justificatifs tels que décrit dans les projets soumis à débat public, non pour remettre en cause la valeur des investissements éolien et/ou nucléaire dont ils font l'objet mais plutôt pour montrer que seule la volonté de faire ou de ne pas faire va permettre de telles démonstrations. Pourquoi ? Parce que ces démonstrations reposent sur **des hypothèses géopolitiques et des décisions politiques futures dont nous ne savons rien aujourd'hui.**

Les retours sur investissement de l'éolien off-shore – cas du projet éolien des deux côtes Picarde et Normande

« La viabilité économique du projet repose sur l'existence d'un tarif d'obligation d'achat (13 centimes d'euro par kWh1). Ce système a été mis en place en France pour favoriser le développement des

énergies renouvelables. Ce tarif est fixé par le législateur de façon à rendre possible la réalisation d'importants investissements et leur financement tout en préservant un coût acceptable pour le consommateur final. En poursuivant ce double objectif, le tarif d'obligation d'achat conduit le maître d'ouvrage à optimiser l'ensemble de ses coûts s'il veut pouvoir amortir son investissement, financer la maintenance et rembourser les emprunts bancaires et intérêts associés.

Le coût de la construction du parc éolien est principalement composé du coût des aérogénérateurs, des fondations et des infrastructures électriques (câblage sous-marin et transformation électrique notamment).

Le coût de ces différents éléments représente environ 90 % du coût total. Pour qu'un projet reste économiquement viable, ce sont ces coûts qu'il faut optimiser. Dans ce contexte, l'éloignement de la côte, la profondeur d'eau correspondante et la puissance d'un parc éolien sont les facteurs essentiels du coût d'un projet. »

« L'institut d'études économiques COE Rexecode a dressé le bilan révisé du programme d'investissement de 36 milliards d'euros qu'il serait nécessaire d'engager pour atteindre l'objectif de 8,2 centimes d'euros par kWh en moyenne jusqu'en 2020 (6,3 centimes d'euros pour l'éolien terrestre, 10,3 centimes pour l'éolien en mer), comparable au prix d'achat de gros de l'électricité qui augmenterait jusqu'à 8,5 centimes par kWh dans la même période. Le surcoût constaté de 4,9 milliards d'euros, qui résulterait des obligations d'achat d'électricité, serait atténué par un avantage économique (non-dépendance au coût des énergies fossiles) et environnemental (valorisation des émissions de CO2 évitées) de 3,9 milliards d'euros. Le bilan global, compte tenu des incertitudes du chiffrage, est considéré par l'Institut comme atteignant l'équilibre vers 2020, ce qui rendra acceptable le coût de production de l'électricité d'origine éolienne et corrélé avec le coût du pétrole. Après 2020, l'éolien devrait devenir moins cher que le coût moyen du marché si les investissements commencent dès aujourd'hui. L'ensemble de ces données démontre l'efficacité économique de l'éolien en mer. Contrairement à d'autres sources d'énergies, son prix tient compte de l'ensemble des paramètres : fabrication, construction, traitement des déchets, démantèlement, assurance, impacts sur la santé et l'environnement, etc.

Les mérites du nucléaire de génération III – cas de l'EPR de Penly

« L'ordre de grandeur du coût de construction recherché pour Penly 3 est autour de quatre milliards d'euros. Cette première évaluation, établie sur la base du retour d'expérience de Flamanville 3 et des études qui sont déjà réalisées, sera précisée à l'issue des appels d'offres pour les contrats principaux. Le coût de revient du MWh produit est actuellement estimé entre 55 et 60 €/MWh. Comme pour les autres centrales, le coût de la déconstruction sera provisionné dès la mise en service du réacteur et garanti par des actifs dédiés surveillés par une commission nationale d'évaluation. »

« Dans le cycle de vie d'une centrale nucléaire, des gaz à effet de serre sont émis en faible quantité principalement dans la phase de construction de la centrale et lors de la fabrication du combustible. Le bilan CO2 de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire est 250 fois plus faible que celui de la production d'électricité à partir de charbon. »

Les enjeux économiques, environnementaux et humains de l'hydrogène énergie

Nous ne nous sommes pas livrés ici à un calcul de rentabilité de l'hydrogène carburant qui, si nous avons un projet fini à vendre, aurait sans doute pu prendre la même forme que les deux précédents exemples. Ce qui semble évident aujourd'hui est l'urgence à investiguer d'autres sources d'énergie à destination du secteur des transports, et ce même si la rentabilité financière immédiate n'est pas démontrée.

Notons que d'après les études parcourues sur le sujet, le calcul du coût de l'hydrogène généré par électrolyse montrerait un coût équivalent du litre d'essence de 1,45€/litre, TVA et TIPP compris. Face à l'augmentation du prix et à la raréfaction de l'or noir, l'hydrogène comprimé aurait le même usage que les hydrocarbures pour le transport routier et maritime, ce qui ne sera pas le cas de la voiture

électrique, qui ne devrait remplacer que 6 % du pétrole actuellement utilisé pour le transport. Notons que BMW et PSA viennent de renforcer leur coopération.

Eléments de la synthèse créative

Notre énergie est trop sérieuse pour déléguer les décisions qui la concernent aux seuls industriels...

Ce projet n'apportera pas toutes les réponses à la question de l'énergie du futur, toutefois il permettra sans doute à ceux qui l'auront lu de voir le secteur de la production d'énergie sous un autre éclairage.

L'énergie n'appartient ni aux industriels, ni aux états qui la génèrent ou en façonne la valeur et le prix. Elle appartient à l'ensemble des acteurs qui sauront se sentir suffisamment impliqués pour accepter de déterminer son avenir. Personne n'apportera de solution idéale toute prête en matière d'énergie mais nous avons suffisamment de moyens intellectuels, pour peu que nous les mettions en commun, pour trouver des solutions qui satisfassent l'ensemble des activités représentées au sein d'un environnement donné.

Pour illustrer cette synthèse, nous emploieront la formule de Mahatma Gandhi « La terre a de quoi satisfaire les besoins de tous, mais pas l'avidité de chacun. »



Références

- * International Energy Agency (IEA), 2005, Prospects for hydrogen and fuel cells, Energy Technology Analysis Report – bibliographique
- * Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), 2004, 2005, 2006, Les clés du CEA – Journal
- * Sciences & Vie, août 2010, Capteurs solaires de nouvelle génération - Magazine
- * European Commission (EC), 2006, World Energy Technology Outlook 2050: WETO-H2 - bibliographique
- * Hyways, 2006, The European Hydrogen Energy Roadmap, HyWays project final report – bibliographique
- * Commission Particulière du Débat Public (CPDP), 2010, Projet de station de production d'électricité nucléaire de Penly – PENLY 3 – web
- * Commission Particulière du Débat Public (CPDP), 2010, Projet de parc éolien en mer des deux côtes – web
- * Laboratoire de Psychologie et Neuropsychologie Cognitives, FRE3292 CNRS Université Paris Descartes – web + bibliographique