

## Editorial

Pour assurer un développement durable, le monde doit pouvoir disposer d'une énergie accessible à chacun et à un coût économiquement et socialement acceptable. Les défis à relever sont donc importants puisqu'aujourd'hui les besoins énergétiques de l'humanité dépendent à 80% des ressources fossiles.

### Améliorer l'Efficacité Energétique : un objectif majeur aux multiples aspects

La France a ainsi fixé des objectifs forts pour faire face aux problématiques climatiques, ainsi qu'à la question de l'épuisement des énergies fossiles et par voie de conséquence à celle de l'indépendance énergétique. Ces objectifs sont reflétés dans la politique nationale et joueront par ailleurs un rôle sur les emplois du pays. Ils sont très ambitieux, essentiellement à deux horizons :

- 2020 (gains en efficacité de l'ordre de 25% à 30%),
- 2050 (facteur 4, soit une efficacité 10 fois meilleure si le PIB croissait d'un facteur jusqu'à 2,5).

Pour atteindre ces objectifs, il nous faudra combiner :

- des réponses technologiques (villes sans carbone, recyclage des biens et des matériaux, efficacité énergétique, structure de la demande) avec une R&D renforcée ;
- une gouvernance politique adaptée (aux niveaux supranational, national, régional, local) avec des instruments réglementaires et économiques ;
- des changements sociétaux (responsabilité climatique et énergétique, et acceptabilité).

Au premier chef, c'est la technologie qui est la clé de la réussite, notamment sur le développement des énergies bas carbone, d'où la nécessité d'une R&D notablement renforcée et dynamisée.

Un moyen pour atteindre ces objectifs techniques est l'amélioration de l'efficacité énergétique. Ce thème nous est donc apparu comme méritant amplement de faire l'objet de notre "Journée I-tésé 2010", puisque nous avons modifié la formule précédente et décidé de donner une logique thématique à nos journées. Cette Lettre se veut en être le reflet et la synthèse.

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne

Directeur de l'I-tésé

## Sommaire

### Discours de l'Administrateur Général du CEA

L'efficacité énergétique : Un enjeu de première importance pour la planète... et la France 2

### Eclairages

L'énergie nucléaire est-elle efficace ? 6

Une analyse économique de la valeur de la R&D dans le domaine des réacteurs rapides de quatrième génération 9

Efficacité énergétique : singulier ou pluriel ?  
*Exemple des biocarburants* 11

Efficacité énergétique et compétitivité économique.  
*Témoignage sur un procédé de production massive d'hydrogène* 13

Efficacité et solaire photovoltaïque 15



## L'efficacité énergétique : Un enjeu de première importance pour la planète... et pour la France

par *Bernard BIGOT*  
*Administrateur Général du CEA*

Ce discours a été prononcé lors de la deuxième journée I-tésé du 3 juin 2010 par la Directrice de cabinet de l'Administrateur Général du CEA, Sophie Galey-Leruste.

L'excellence française en matière d'intensité énergétique comparée à d'autres pays ne date pas d'hier. Elle est dans les grandes lignes le fruit de politiques économiques résolues qui ont incité à une croissance relativement sobre en énergie et d'actions aussi bien sur les plans technique que réglementaire pour améliorer constamment l'efficacité énergétique du pays. Ainsi, les choix faits dans les années 1960 et 1970 d'investir massivement dans l'énergie électronucléaire confèrent à la France un bilan énergétique favorable, avec une bonne efficacité énergétique et une moindre dépendance aux ressources fossiles que beaucoup d'autres pays. Le recours au nucléaire permet également de rejeter très peu de gaz à effet de serre (GES) pour la production d'électricité.

Les résultats de la politique française, constante quels que soient les gouvernements successifs, ont ainsi permis à notre pays de disposer d'une intensité énergétique (rapport de l'énergie primaire consommée et du PIB) qui se positionne bien au sein de l'Europe, et dispose surtout d'un bilan carbone très favorable.

Cette démarche française s'inscrit dans les grands objectifs mondiaux et européens. Ainsi, le Conseil européen de mars 2007 a annoncé les objectifs climatiques dits « 3 x 20% » à l'horizon 2020, qui sont notre feuille de route, bien connue au sein du CEA.

En outre, au plan national, la volonté politique de soutenir les énergies propres a été soulignée à plusieurs reprises : par les engagements pris après le Grenelle de l'environnement, qui a notamment rappelé l'objectif de diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050, par rapport à 1990 (« facteur 4 »), par les choix de financement retenus dans le Grand emprunt national, ou encore par la décision d'investir à parts égales dans la recherche sur l'énergie nucléaire et dans celle sur les énergies renouvelables.

En cohérence avec ces grands desseins, le Président de la République, à l'occasion de la présentation des priorités financées par l'Emprunt national pour les investissements d'avenir, a annoncé le 14 décembre 2009 le changement de nom du CEA. Ainsi, le CEA est officiellement devenu **le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives** depuis le 10 mars 2010 démontrant ainsi une reconnaissance des travaux menés par le CEA depuis une dizaine d'années sur les énergies décarbonées et légitimant son rôle d'opérateur majeur de la recherche scientifique et technologique dans ce domaine.

Par énergies alternatives, on entend naturellement les solutions alternatives aux combustibles fossiles, avec le rôle central joué par les énergies renouvelables.

Le CEA positionne sa recherche sur la production, la gestion et les utilisations d'une énergie décarbonée, avec un rôle central dévolu au vecteur électricité. Son action vise principalement à améliorer l'efficacité énergétique des filières et des systèmes de demain. Ainsi, nous développons principalement des technologies et des procédés dont un des objectifs majeurs est de consommer moins et de consommer mieux : c'est la poursuite de l'accroissement de l'efficacité énergétique, dans une logique qui va en s'accéléralant.

Nos actions de R&D visent à développer les meilleures technologies pour produire de l'électricité ou de la chaleur sans émission nette de gaz à effet de serre, optimiser leur usage avec un objectif d'efficacité énergétique, et développer le stockage de l'électricité pour équilibrer à tout instant la production et la consommation.

Dans le domaine énergétique, le CEA travaille sur les composantes majeures suivantes :

- Tout d'abord, **la production d'électricité à partir d'énergie nucléaire et d'énergie solaire**. Pour le

nucléaire, les recherches portent sur l'optimisation du parc actuel et le développement des systèmes de 4<sup>ème</sup> génération. Pour le solaire, il s'agit essentiellement du solaire photovoltaïque et du solaire à concentration, avec la problématique essentielle du stockage.

- Nous travaillons également au développement d'une **nouvelle offre de carburants à partir de biomasse** à même de réduire la consommation d'hydrocarbures fossiles.

- **La gestion de l'électricité et de son intermittence par du stockage et des systèmes électriques intelligents** permettant une meilleure adaptation de l'offre et de la demande électrique est également une de nos priorités. Deux modes de stockage sont étudiés : le stockage électrochimique et le stockage chimique sous forme notamment d'hydrogène utilisé dans la synthèse de biocarburants à partir de biomasse.

- Et enfin notre action porte sur **l'utilisation de l'électricité** dans deux applications fortement émettrices de gaz à effet de serre. Tout d'abord **le bâtiment** avec des recherches sur la conception, l'intégration de l'énergie solaire et la gestion optimisée de l'énergie. Ensuite **les transports** avec le développement de batteries et de piles à combustible pour les véhicules électriques et hybrides.

Parmi ces recherches, une part significative est dévolue à l'amélioration de l'efficacité énergétique par la voie la plus directe : celle de l'amélioration des rendements. Cette recherche est menée tant dans une logique de progrès incrémental que de saut technologique avec recours à des matériaux innovants. A titre d'exemple, je citerais les recherches conduites pour améliorer les limites actuelles des cellules photovoltaïques et atteindre des rendements de 30% et plus, grâce à l'utilisation des nanotechnologies. Les premiers résultats sont très prometteurs, mais tout reste à faire pour amener cette technologie à une maturité suffisante pour être transférée à un industriel.

Un autre exemple emblématique de l'efficacité énergétique est la production de biomasse par ajout d'hydrogène produit par électrolyse, alcaline ou à haute température, pour augmenter le rendement en biomasse d'un facteur 2. Ainsi, l'ajout d'hydrogène "vert" (sans CO<sub>2</sub>) permettra-t-il de produire deux fois plus de biocarburant, en préservant la ressource rare qu'est la biomasse.

Toutes ces actions dépassent largement les cadres traditionnels et je souhaiterais profiter de cette journée pour vous présenter 4 points saillants, qui, de mon point de vue, indiquent clairement que nous sommes en train de changer d'époque, parce que nous

changeons notre vision du futur et la nature de nos actions pour forger ce futur.

**Premièrement**, ce n'est plus seulement par l'amélioration "incrémentale" des techniques que nous ferons suffisamment diminuer l'intensité énergétique. Un moteur essentiel pour remplir cet objectif de moindre consommation, à service rendu égal ou supérieur, est en effet devenu la substitution de technologies en place par des technologies plus performantes. C'est largement dans cette modalité d'action que le CEA excelle, de par sa capacité à proposer des sauts technologiques associant innovation et performances énergétiques, par exemple en développant les nanotechnologies.

**Deuxièmement**, il est important de noter une récente évolution dont le CEA est un acteur essentiel : ce ne sont plus les rendements unitaires qui sont seuls source d'efficacité, ni même la substitution "locale" d'une technique à une autre, mais bien aussi l'émergence de nouveaux systèmes, plus complets et complexes, associant des énergies bas carbone et des vecteurs performants, notamment le vecteur électrique.

Il existe aussi des systèmes tirant leur efficacité de la complémentarité dans le temps de leurs constituants. Il en est ainsi des réacteurs à eau actuels et des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération qui pourront fonctionner pendant des décennies de façon "symbiotique", les seconds s'alimentant par le plutonium produit par les premiers, et étant capables – si la décision en était prise – de réduire la toxicité des déchets de ces premiers réacteurs.

**Une troisième évolution structurelle** réside dans la mise en évidence de synergies entre nucléaire et énergies alternatives. Un exemple emblématique est l'association de la production d'électricité d'origine nucléaire, photovoltaïque, ou éolienne et de son stockage à travers la production d'hydrogène par électrolyse à haute température pour usage dans les transports, sous forme d'hydrogène *via* les piles à combustible ou de biocarburants. On peut aussi parler de "synergie par les modalités de gestion" entre nucléaire et énergies alternatives, dès lors que l'intérêt pour le stockage constitue un point de convergence qui stimule – à la fois pour application au nucléaire et pour application aux énergies alternatives – les efforts de R&D sur le stockage. Ces exemples illustrent les propos du Président de la République qui disait à l'INES, il y a environ 1 an, qu'il nous fallait "...prendre dans les énergies renouvelables un virage aussi important que celui que le général de Gaulle a pris pour le nucléaire dans les années 1960. Ce n'est pas l'un ou l'autre. C'est l'un et l'autre".

Enfin, en **quatrième point**, il nous faut constater qu'un renouvellement de concepts économiques se prépare. En effet, nous sommes en train de développer des concepts et des techniques qui rendent "poreuses" les dénominations d'offre et de demande. Ainsi, la loi NOME, en cours de discussion, envisage de traiter de la même façon la garantie de puissance électrique disponible apportée par une turbine à gaz et celle apportée par un regroupement de consommateurs capables de s'effacer de façon concertée. Une gestion performante de la demande permettrait de la sorte de créer des centrales virtuelles! Autre exemple : ce mouvement d'interpénétration, qui résulte à la fois de la présence d'énergies alternatives décentralisées et de progrès dans l'optimisation des systèmes, est aussi très présent dans l'intégration du solaire au bâti ou dans la gestion future des batteries des véhicules électriques comme des moyens de gestion des réseaux.

Améliorer l'**efficacité énergétique** est bien un enjeu de première importance pour la planète et pour la France. Mais ce n'est pas pour autant un enjeu unique. En effet, d'autres objectifs doivent être intégrés dans les choix qui nous animent. Bien entendu, le coût rapporté au service fourni est un critère qui s'impose. Mais au-delà, deux préoccupations majeures guident nos décisions :

- o l'**indépendance énergétique** de la France et de l'Europe, doublée d'une capacité à développer nous-mêmes nos technologies jugées stratégiques (et l'énergie en est emblématique),

- o **et notre capacité à développer des techniques** qui nous placent aux avant-postes des marchés et induisent de ce fait des conséquences directement porteuses d'emploi, de croissance et de dynamisme à l'exportation.

La recherche d'une efficacité énergétique accrue est un moteur puissant pour satisfaire ces deux objectifs, mais on ne saurait confondre ces critères. Qu'on songe par exemple aux impacts sur l'emploi très contrastés que peuvent engendrer deux stratégies de production de biocarburants de seconde génération, selon que l'on importe la biomasse ou qu'on la produise localement.

A terme, compte tenu de ces enjeux, nous aurons **besoin de renforcer significativement l'effort de R&D énergétique**. D'ici quarante ans, l'objectif de la France et de l'Europe est de réduire d'un facteur de l'ordre de 4 l'intensité énergétique. L'essentiel des moyens pour satisfaire ce très ambitieux programme est de nature technique. Le CEA, avec ses très nombreux alliés, joue dans cette partition un rôle central.

En effet, pour ne pas dépasser les possibilités de régulation planétaire, il faudrait ramener la moyenne

mondiale d'émissions annuelles à 500 kg par habitant en 2050, soit moins du double de la consommation unitaire des habitants d'un pays émergent comme l'Inde.

Ainsi, un effort majeur est nécessaire pour que nous soyons à la hauteur des espoirs qui sont placés en nous et en nos technologies.

Trois constats illustrent ce propos :

1. **Les niveaux de dépenses de R&D actuels** sont souvent inférieurs en Europe à ce qui a été souhaité lors de l'établissement du traité de Lisbonne avec un objectif de 3% du PIB. La France a pris la mesure des risques qui seraient associés à un retard trop lourd : elle est donc bien placée, notamment avec le nucléaire au regard des situations de nos voisins. Il nous faudra toutefois maintenir et – au-delà – intensifier nos efforts dans les prochaines années.

2. La quasi-totalité des analyses économiques montre que dans un secteur en cours de libéralisation, comme le secteur énergétique, **les enjeux de court terme** pèsent de plus de poids pour les entreprises. Il s'en suit que les comportements sont **moins favorables à la R&D**, d'autant plus que celle-ci trouve ses objectifs dans le moyen ou le long terme.

De nombreux modèles économiques expliquent alors que l'optimum est atteint lorsque la puissance publique prend le relais et intensifie ses actions de recherche.

3. **L'effort nécessaire pour la R&D énergétique** est plus important que tout ce qui a été fait par le passé. Supposons une croissance économique de 2% par an, soit un doublement du PIB en 40 ans. Si seulement la moitié du facteur attendu était dû aux améliorations d'intensité énergétique des procédés, il nous faudrait en quarante ans réduire par 4 la consommation du parc de véhicules en énergie fossile, amener le parc immobilier (et ses habitants !) à réaliser des gains sans équivalent, développer de nouvelles applications électriques et électroniques plus nombreuses (y compris l'intelligence des smart grids) mais très peu gourmandes ... tout en maintenant un parc électrique à très faibles émissions de CO<sub>2</sub> via la production d'énergie décarbonée et en accentuant la gestion intelligente des réseaux (à nouveau *via* les smart grids). Si l'on constate qu'en 40 ans, de 1970 à 2010, l'intensité énergétique de la France a été améliorée de 30 à 40%, grâce à toute l'étendue des programmes menés avec constance, on doit s'en féliciter, mais on peut aussi mesurer la distance qui reste à parcourir en ce début de siècle.



Dans cette optique, l'**Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE)** créée en 2009 s'inscrit dans la volonté du gouvernement de renforcer l'efficacité de la recherche dans le domaine de l'énergie, en coordonnant davantage la programmation scientifique et technique de l'activité de R&D de ses membres et en favorisant les partenariats et les synergies entre les acteurs publics et privés du secteur. L'ANCRE au delà des trois membres fondateurs, CEA, CNRS et IFP, travaille en contact étroit avec l'ensemble de ses nombreux partenaires associés, les établissements d'enseignement supérieur et organismes de recherche en lien avec l'énergie. Son rôle est appelé à être central dans l'obtention des objectifs rappelés dans cet article.

Tout à l'heure, le représentant d'Olivier Appert, Président en exercice du Comité de coordination de l'Alliance, nous en précisera les enjeux et l'avancement des travaux.

**En conclusion**, on peut constater que l'antagonisme entre nucléaire et énergies nouvelles est désormais dépassé dans la grande majorité des esprits - la recherche des synergies entre ces deux composantes est systématique -, mais à l'inverse les concepts d'offre et de demande sont à refonder en partie. L'heure est à la recherche de systèmes innovants rassemblant de nombreuses technologies et des modes de pilotages "intelligents" réunissant producteurs et consommateurs.

Et surtout, les besoins de limitation de notre consommation d'énergies fossiles n'ont jamais été si pressants.

Dans ce contexte, l'augmentation de l'efficacité énergétique de la France - et bien au-delà des limites de l'Hexagone - est donc un objectif prioritaire. A cette fin, les besoins en R&D énergétique n'ont jamais été aussi élevés.

Cette stratégie ne peut être poursuivie avec de réelles chances de succès, que si nous disposons d'une expertise économique adaptée pour comprendre, anticiper, évaluer et orienter.

Cette compétence, le CEA l'a créée en son sein avec l'Institut de Technico-Economie des Systèmes Énergétiques. L'Institut dispose de nombreux atouts telle sa logique largement transverse en interne CEA, faisant le lien entre nucléaire et énergies alternatives, son rôle de "plaque-tournante" des questions économiques, sa compétence orientée "systèmes" et son réseau, largement ouvert aussi sur l'extérieur, notamment au sein du "Plateau de Saclay" où l'I-tésé anime le "Club de l'Orme". Ce Club regroupe d'éminents économistes et techniciens de l'énergie dont certains s'exprimeront cet après-midi.

L'I-tésé a organisé sa deuxième journée le 3 juin, et a choisi le thème de l'efficacité énergétique. Cet article trace un certain nombre de pistes pour ses travaux futurs, qui à leurs tours contribueront à la meilleure orientation de nos programmes de recherche.

# L'énergie nucléaire est-elle efficace ?

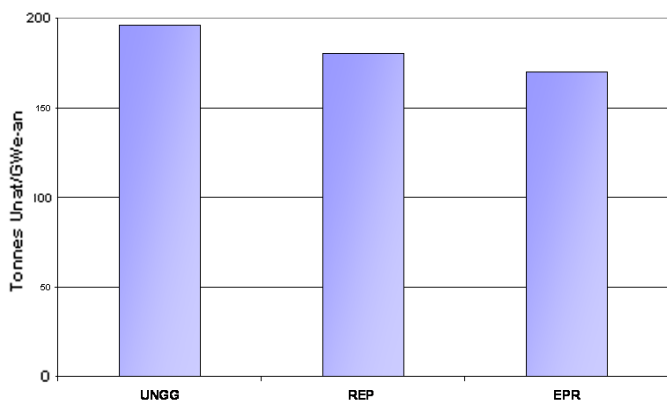
par Gilles MATHONNIERE et Frédéric LEGEE

L'énergie nucléaire a la réputation d'une formidable capacité de production énergétique, extraite d'une masse réduite de combustible. Et pourtant il s'avère que seule une très faible partie du potentiel est actuellement utilisé.

## Compétitivité ne rime pas avec efficacité

Aujourd'hui l'énergie nucléaire est tout à fait compétitive en base et semi-base, comme le rappellent les débats sur la loi NOME ou le récent rapport "Projected Costs of Generating Electricity" publié conjointement par l'OCDE/AEN et l'Agence Internationale de l'Energie qui montre que cette compétitivité économique est établie partout dans le monde.

Cette forme d'énergie est capitalistique, car elle demande des investissements élevés, représentant plus de 60% du coût du kWh ; le coût de l'uranium naturel contribue à 40% du coût du cycle qui ne représente qu'un peu moins de 20% du coût total du kWh.



La consommation en U naturel dans les différentes générations de réacteurs (sans recyclage des matières valorisables)

*Une utilisation assez médiocre de l'uranium naturel, soit moins de 1% avec les réacteurs actuels*

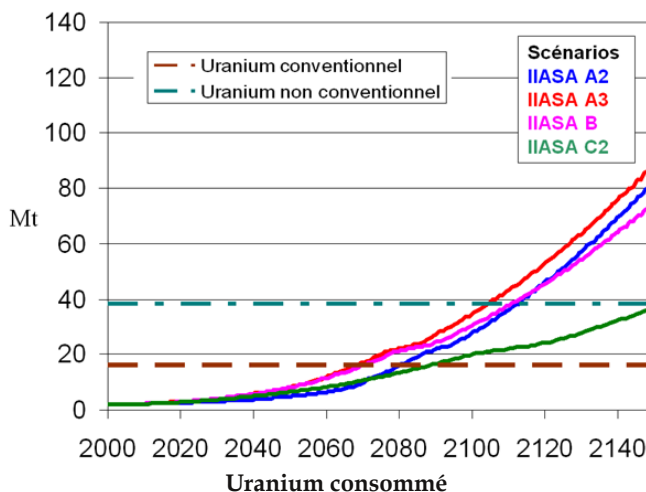
Très efficace sur le plan économique, l'énergie nucléaire actuelle est par contre peu efficace en matière d'utilisation des ressources naturelles, puisque seul 0,5 à 1% de l'uranium naturel est effectivement transformé en énergie.

Pour savoir si cette mauvaise performance peut être un frein pour son avenir, il faut regarder successivement trois aspects :

- les ressources en uranium naturel,
- l'augmentation du parc nucléaire mondial installé,
- les avancées technologiques envisageables et en particulier celles améliorant l'efficacité de l'utilisation des réacteurs nucléaires.

## Les ressources en uranium doivent être économisées

Les ressources sont de 16 millions de tonnes d'uranium conventionnel et d'environ 22 millions de tonnes d'uranium non conventionnel (phosphates). Même si c'est l'information qui fait autorité sur le sujet, il faut rester prudent sur ces estimations qui figurent dans le livre rouge de l'OCDE/AEN et de l'AIEA : elles sont sujettes à des réactualisations périodiques et les chiffres concernant les ressources non conventionnelles sont peu précis. En dépit d'une brève flambée en 2007, le faible cours actuel de l'uranium ne favorise pas la prospection et donc la découverte de nouveaux gisements.

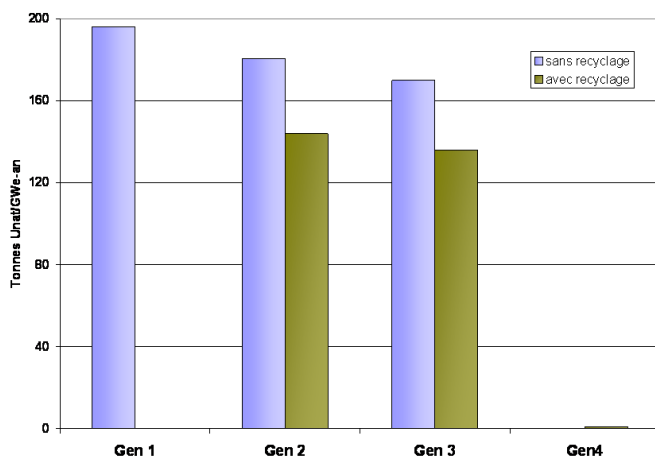


Scénarios avec des REL actuels pour répondre à la demande en électricité nucléaire

Dans une prospective associant de faibles ressources en uranium naturel et une forte croissance du parc nucléaire mondial, toutes les ressources en uranium naturel sont engagées à partir de 2040 si le parc mondial n'est constitué que de REL. Avec des hypothèses plus "moyennes", les difficultés sont repoussées en 2080 voire au-delà en cas de réduction extrêmement volontariste des besoins mondiaux en énergie.

### Les réacteurs à neutrons rapides : la solution de référence pour répondre à une demande énergétique qui va décupler

En conséquence, il est nécessaire de se doter de systèmes de 4<sup>ème</sup> génération qui, en assurant une efficacité d'utilisation de l'uranium naturel d'un facteur 50 à 100 fois supérieur à celui des REL, sont les seuls à permettre la durabilité de l'énergie nucléaire sur plusieurs millénaires. Cependant les études montrent qu'il ne sera pas possible, par manque de stocks de plutonium au niveau mondial, de répondre aux besoins en électricité d'origine nucléaire d'ici à 2100-2150 sans continuer à avoir recours à des REL.



Un gain significatif de la génération 1 à la génération 4

La R&D doit donc être menée sur deux axes : le premier en rupture technologique pour mettre au point des systèmes de 4<sup>ème</sup> génération, le second plus évolutionnaire, à mener sur les REL actuels pour les améliorer du point de vue de l'utilisation des ressources.

### Les réacteurs de type actuel, à eau légère, devront eux aussi se transformer

Parmi les points permettant de diminuer la consommation des REL actuels, on peut citer l'abaissement du taux de rejet de l'enrichissement (-20% de consommation d'Unat), la généralisation au niveau mondial de la solution de traitement (-25% par rapport au cycle ouvert), l'augmentation du fractionnement des recharges (-10 à -15%), la

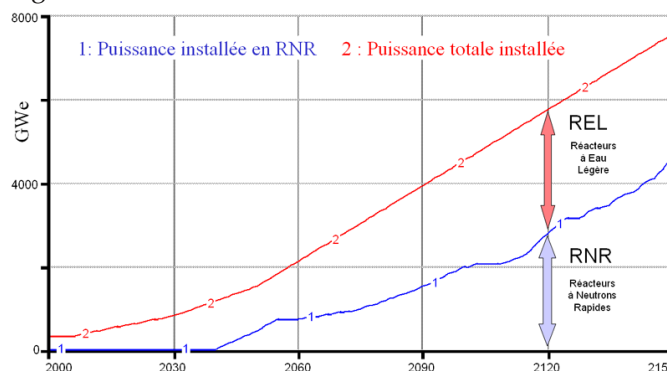
diminution des fuites (le *baffle* lourd d'EPR permet d'économiser 5% d'Unat). Enfin, on évoque régulièrement les REL à haut facteur de conversion (REL HFC) et l'utilisation du thorium comme moyens d'économiser les ressources en uranium naturel.

Les REL HFC reposent sur un durcissement du spectre diminuant les captures stériles. Ce durcissement est en général obtenu par une présence d'eau plus faible, ce qui pose par contre des problèmes de conception au niveau de la thermo-hydraulique. Il serait ainsi possible d'économiser de 40 à 60% d'uranium naturel. Il faut cependant souligner que pour arriver à de bonnes performances, les REL HFC ont besoin d'un inventaire en plutonium conséquent qui entre en compétition avec les besoins des RNR.

Le thorium naturel n'a pas d'isotopes fissiles et n'a d'intérêt que parce qu'il permet de créer de l'uranium 233, isotope fissile meilleur que l'uranium 235. Il est donc envisageable d'avoir en U233/Th des REL HFC plus performants qu'avec du Pu239/U238, la réalisation de surgénérateur U233/Th est même envisageable, la faisabilité technologique restant à démontrer. Si l'uranium 233 est un isotope intéressant, son obtention passe par la fabrication et le traitement de combustible U233/Th qui se heurtent à deux problèmes complexes : le combustible n'est pas soluble dans l'acide nitrique, ce qui oblige à industrialiser le procédé THOREX et à construire des usines de traitement dédiées ; le second est que la présence de forts émetteurs  $\gamma$  oblige à concevoir des chaînes de fabrication blindées et automatisées. Dans ces conditions, l'utilisation du thorium n'est pas envisageable au niveau industriel avant une cinquantaine d'années.

### Un subtil dosage, entre réacteurs à neutrons rapides et réacteurs à eau légère

Une période significative de coexistence entre RNR et REL est donc impérative pour permettre la production du plutonium nécessaire à l'installation du parc de génération 4.



REL et RNR : une symbiose nécessaire

Mais cette production maximisée de plutonium peut amener à puiser plus fortement dans les ressources en uranium naturel. Des équilibres seront donc à trouver pendant la phase de transition vers un parc nucléaire évalué par l'IIASA à plusieurs milliers de GigaWatts à la fin du siècle.

### Un nucléaire efficace c'est un nucléaire qui réduit ses déchets ultimes

Ainsi un cycle électronucléaire idéalement efficace et durable doit réduire au maximum les "entrées" (les ressources naturelles épuisables), mais aussi les "sorties", autrement dit, les déchets radioactifs.

L'amélioration des techniques de recyclage des combustibles, depuis 20 ans, a déjà permis de réduire par 5 les volumes des déchets qui devront être stockés en couche géologique profonde.

En France les options de transition vers un parc de RNR sont encadrées par la loi de juin 2006 sur les déchets radioactifs. Ce sont prioritairement les moyens de minimiser encore leur volume et radioactivité, à des conditions économiques acceptables qui orienteront notre chemin.

Beaucoup de scénarios sont possibles, selon les techniques de transmutation des actinides mineurs et selon les calendriers de déploiement. Ces techniques diminueront de plusieurs milliers de fois la radioactivité résiduelle et d'un facteur supérieur à 2 les colis vitrifiés destinés au stockage ultime.

Un stockage souterrain avec des dizaines de kilomètres de galeries en moins, un combustible sans ressources naturelles à utiliser, mais plus complexe à produire ... l'économie des systèmes nucléaires futurs sera bouleversée.

### Sans boule de cristal, comment assurer la transition vers un nucléaire durable ?

Encore faut-il évaluer les conditions économiques favorables aux systèmes à neutrons rapides. Les prix de l'uranium, des matières premières et matériaux avancés en particulier restent très difficiles à évaluer sur des périodes de l'ordre du siècle.

Il faut donc pouvoir envisager des futurs contrastés et par conséquent des techniques flexibles.

Par exemple découpler les objectifs de production efficace d'électricité, sans uranium naturel et de gestion efficace des déchets, par transmutation dite "hétérogène" apportera une flexibilité certaine, mais au prix d'une complexité plus élevée.

Enfin la capacité de s'adapter en fonction des contraintes externes, sera d'autant plus grande qu'un effort de R&D est maintenu. La poursuite de la recherche, tant sur les Réacteurs à Eau Légère, que sur les Réacteurs à Neutrons Rapides, reste une "assurance" pour atteindre l'efficacité recherchée.



# Une analyse économique de la valeur de la R&D dans le domaine des réacteurs rapides de quatrième génération<sup>1</sup>

par *Nathalie POPIOLEK* et *Gilles MATHONNIERE*

Parmi les outils dont dispose l'économiste pour éclairer le décideur confronté au risque, figure l'arbre décisionnel représentant dans le temps la séquence des décisions que celui-ci peut prendre étant donnée l'arrivée d'information sur la période considérée.

En faisant des hypothèses simplificatrices, cette méthodologie a été utilisée pour donner à la puissance publique des moyens supplémentaires d'appréhender les conséquences des décisions qu'elle sera amenée à prendre en 2012 quant à la poursuite ou non de la R&D dans le domaine des réacteurs de quatrième génération, et ce compte tenu des incertitudes pesant sur le marché industriel des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

## L'uranium : une ressource épuisable

L'uranium est une ressource limitée : selon l'Agence Internationale de Energie Atomique et l'Agence de l'Energie Nucléaire, les réserves mondiales d'uranium identifiées s'élèvent à 5,5 millions de tonnes, assurant à peu près 80 ans de fonctionnement au parc nucléaire mondial actuel dans l'hypothèse d'une capacité installée stable. Vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, l'intégralité des ressources conventionnelles en uranium connues à ce jour pourraient être épuisées et d'après les prévisions, le marché de l'uranium pourrait commencer à se tendre vers le milieu du siècle.

## Un programme de R&D pour une filière nucléaire durable

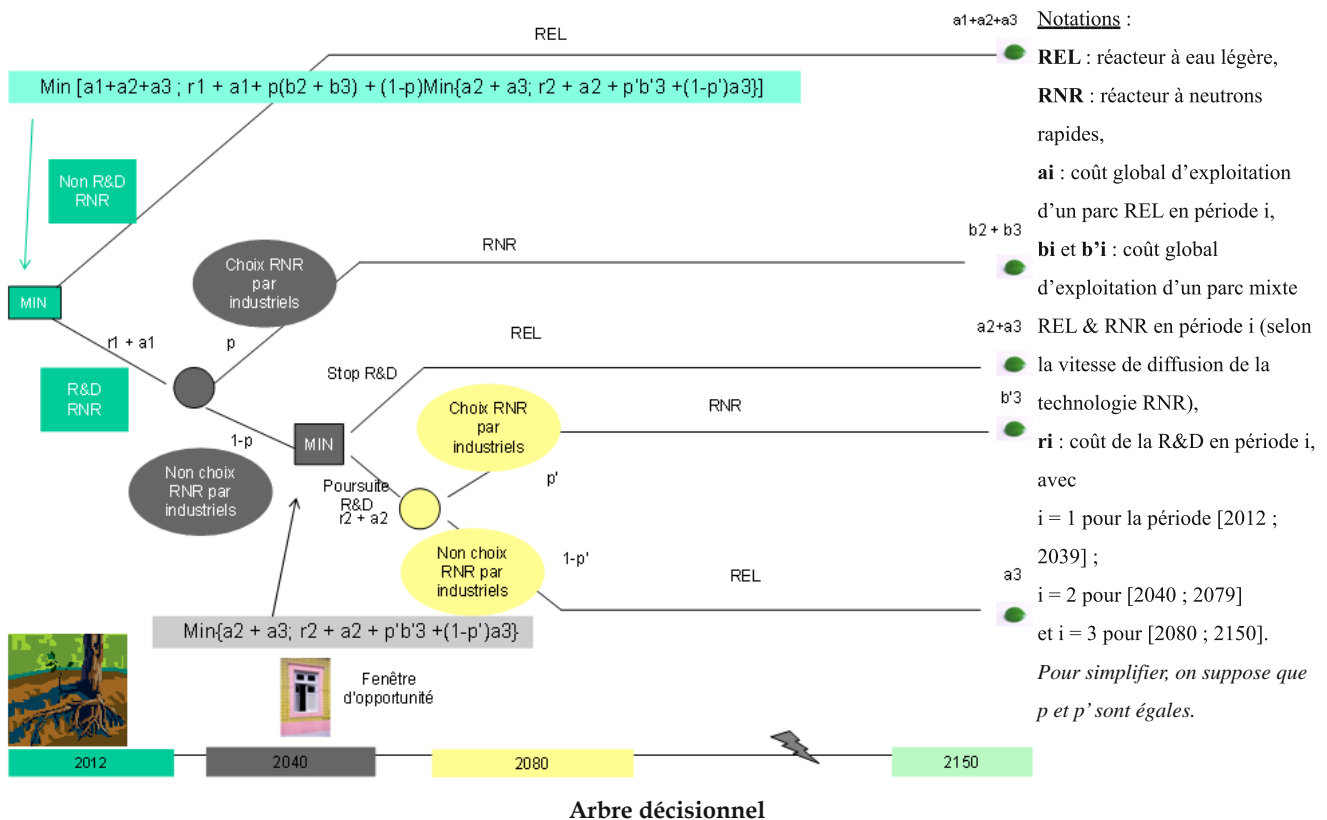
C'est dans ce cadre d'hypothèse qu'I-tésé cherche à évaluer la valeur de la R&D publique dans le domaine des réacteurs rapides de quatrième génération. En effet, par opposition aux réacteurs actuels, les réacteurs à neutrons rapides permettent une meilleure utilisation de l'uranium naturel et sont à même de jouer un rôle essentiel dans une perspective " durable ". Cependant, ces technologies ne déboucheront qu'au prix de progrès significatifs et nécessiteront un important investissement dans la R&D, avec notamment la construction, pour ce qui est des réacteurs rapides refroidis au sodium, du prototype industriel Astrid (dont le financement devrait être couvert au moins pour moitié par des investissements industriels, avec un coût en partie rentabilisé par sa production d'électricité).

## Un arbre de décision qui représente les fenêtres d'opportunité et aide à l'estimation dans le risque, de la valeur économique de la R&D

I-tésé cherche à évaluer la valeur économique de cette R&D sans regarder les externalités positives auxquelles elle pourrait conduire par ailleurs comme par exemple une meilleure acceptabilité de l'énergie nucléaire du fait de la diminution du volume et de la radiotoxicité des déchets ultimes. On regarde l'intérêt de disposer de cette technologie innovante pour faire face à l'augmentation attendue du prix de l'uranium durant ce siècle. Si ce renchérissement est une donnée d'entrée du modèle, la diffusion sur le marché, à l'issue de la phase de R&D, des réacteurs de quatrième génération, est une variable supposée risquée, conditionnée par la réalisation de deux scénarios probabilisés (respectivement par  $p$  et  $1-p$ ) : " le réacteur rapide est compétitif et adopté par les industriels " ou " il ne réunit pas ces conditions " (cf. arbre décisionnel).

Compte tenu de ses hypothèses simplificatrices, le modèle donne la valeur de la R&D en fonction d'une estimation *a priori* de la probabilité  $p$ . Cette valeur est comparée à son coût et permet ainsi de juger, du point de vue strictement économique, la pertinence de poursuivre ou pas le programme de R&D en 2012, qui est la date où la puissance publique devra se prononcer. Avec les données retenues et une

<sup>1</sup> D'après l'article du même nom, publié en mai-juin 2010 dans la Revue de l'Energie, n°595.



hypothèse basse pour le coût de la R&D, le programme de R&D est jugé rentable, si la probabilité p est au dessus de 20%. Très logiquement, le seuil de probabilité augmente avec le coût de la R&D : il atteindrait près de 70% dans le cas extrême où il faudrait financer la totalité du prototype industriel Astrid sur fonds uniquement publics sans bénéficier ni de financements initiaux des industriels, ni de la valorisation *a posteriori* de la propriété intellectuelle, ni non plus des retombées positives liées à la vente de son électricité (cette hypothèse très pénalisante pour la R&D n'est cependant pas réaliste ; elle donne la fourchette haute pour le seuil de probabilité).

## Un premier calibrage du modèle riche d'enseignements... mais à rendre plus réaliste

Ce premier calibrage illustre la méthode qui pourra ensuite être affinée pour coller au plus près des données qui sont en cours d'élaboration. Il montre d'ores et déjà que, sous l'hypothèse plausible d'un renchérissement significatif du prix de l'uranium et en supposant que l'effort de financement est partagé (public et privé), il est possible de définir des choix optimaux correspondant à continuer un programme de R&D, même en jugeant *a priori* que les probabilités d'occurrence de conditions favorables où les techniques mises au point seront utilisées, sont "faibles" (ici de l'ordre de 20% dans l'un des cas traités). Selon la valeur du prix futur de l'uranium que

l'on retient comme paramètre d'entrée du modèle, la compétitivité relative des réacteurs fluctue, ainsi que le niveau de la probabilité minimum requis pour confirmer à plus grande échelle la R&D en 2012. Enfin, il est important de souligner que cette décision devrait être renforcée en raison des externalités positives de la recherche, dont pourraient bénéficier d'autres projets (utilisation des connaissances obtenues), voire l'économie tout entière (retombées de la R&D sur la croissance et l'emploi). Ces externalités n'ont pas été intégrées dans la modélisation. Notons cependant que l'argument des retombées macro-économiques de la R&D est à avancer avec prudence car celles-ci ne sont pas toujours faciles à démontrer. L'I-tésé a commencé une revue de la littérature économique dans ce domaine pour essayer d'y voir un peu plus clair, concernant notamment la R&D conduite dans le secteur énergétique.

# Efficacité énergétique : singulier ou pluriel ?

## Exemple des biocarburants

par Juliette IMBACH et Christine MANSILLA

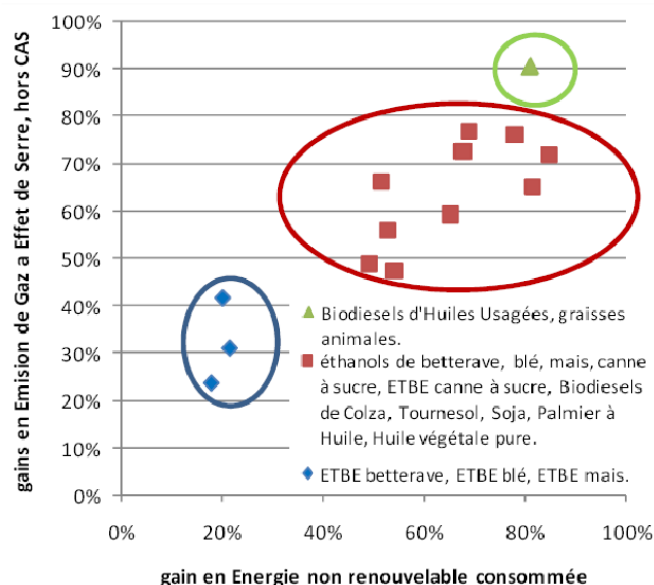
Le rendement paraît un critère simple, surtout quand il s'agit d'un procédé isolé. Le cas des biocarburants montre que l'évaluation d'une filière est bien plus complexe. Faut-il évaluer une filière seulement isolément ?

En se focalisant sur le critère « rendement », un récent article de *Science*<sup>1</sup> condamnait la filière biocarburants au profit de l'utilisation dans des véhicules électriques d'électricité produite à partir de biomasse. Mais cette conclusion est-elle recevable ? En effet, en se concentrant sur le rendement de la filière, de nombreux autres critères sont occultés. On pourrait par exemple objecter que le véhicule électrique n'est pas adapté à toutes les typologies d'usage (essentiellement pour les trajets courts en lien avec l'autonomie de la batterie) et que son prix représente encore une barrière importante. Par ailleurs, les biocarburants peuvent dès à présent alimenter les véhicules actuels, sans modification majeure ni de la technologie véhicule, ni du réseau de distribution, à la différence des véhicules électriques. Une analyse polarisée sur le rendement ne tient pas plus compte du contexte qui pose par exemple la question de la pertinence de la production électrique à partir de biomasse quand des solutions alternatives existent.

### Sortir de la dichotomie première génération-deuxième génération (1G - 2G)

Jusqu'à récemment, les filières de biocarburants ont, dans une même logique, été opposées frontalement : la première génération (1G) de biocarburants a été sous le feu de vives critiques, notamment en termes de compétition avec l'alimentation, la deuxième génération (2G) était alors attendue pour venir se substituer totalement à la première.

Cependant, de récents résultats de l'Ademe montrent que, sous réserve de satisfaire certaines conditions telles que le fait de ne pas favoriser le changement d'affectation des sols, le bilan de la première génération n'est pas si négatif. En effet, certaines filières 1G permettent dès à présent des réductions d'émissions de gaz à effet de serre de 60 à 80% par rapport aux carburants classiques (voir figure ci-contre). Néanmoins, notamment afin de respecter les objectifs réglementaires<sup>2</sup>, certaines filières dont les gains sont plus faibles (cas des filières ETBE par exemple) vont vraisemblablement disparaître au fil du



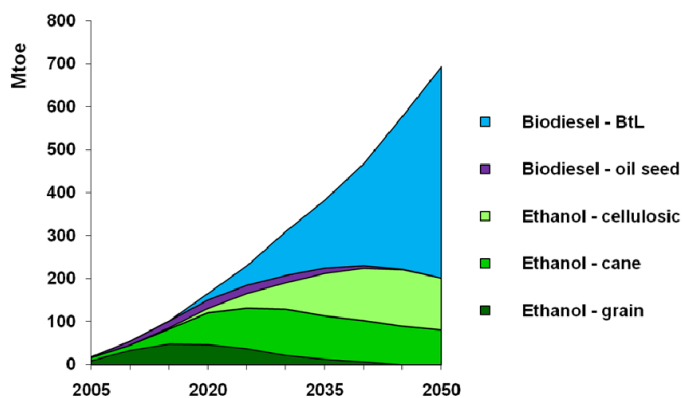
### Analyses de cycle de vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France (Ademe, 2010)

temps. Par ailleurs, de façon plus large, la part des ressources agricoles dédiée à la production de biocarburant est amenée à plafonner sous peine de favoriser la compétition avec un usage alimentaire.

Dans le scénario BLUE Map permettant une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> suffisante pour limiter le réchauffement de la planète à une élévation des températures comprise entre 2°C et 2,4°C, l'AIE prévoit un déploiement important de la deuxième génération (voir figure ci-après). Ainsi, les filières ne s'opposent pas, mais viennent se compléter afin d'alimenter l'offre de carburants. On observe une co-existence des filières de production de biocarburants issues de ressources alimentaires et ligno-cellulosiques d'ici à 2050. La filière BtL (Biomass to Liquid), celle qui permet de produire du diesel d'origine renouvelable, voit son rôle s'affirmer progressivement,

<sup>1</sup> J.E. Campbell, D.B. Lobell, C.B. Field, "Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol", *Science*, May 2009. doi:10.1126/science.1168885

<sup>2</sup> Directive EnR 2009/28/CE indiquant une réduction d'au moins 35% des émissions de GES en 2010, puis 50 % en 2017



Scénario BLUE Map (AIE, 2008)

mais ne se substitue pas aux meilleures filières 1G (éthanol de canne à sucre par exemple). Et pour aller au-delà, on s'attend à une diversification des technologies automobiles vers l'électrique. Les biocarburants resteront malgré tout essentiels pour les applications qui auront du mal à s'affranchir de carburants liquides, telles que l'aviation ou le transport par camion.

## La filière 2G : des enjeux en termes de ressources et de compétitivité économique

En ce qui concerne la filière BtL, elle doit voir sa part augmenter dans le mix carburants à moyen terme, pour répondre en particulier aux besoins en kérosène "vert" dans le domaine de l'aviation. Les enjeux résident dans le compromis entre économie de la ressource et compétitivité. Pour ce faire, deux options sont envisagées :

- la production par voie autothermique dans laquelle la biomasse, partiellement transformée en carburant, subvient également aux besoins énergétiques du procédé ;
- la production par voie allothermique qui permet un meilleur rendement massique (plus de carburant liquide pour une même quantité de biomasse en entrée), à condition d'apporter de l'hydrogène en quantité non négligeable.

Au niveau actuel de connaissance, d'un point de vue économique, ces deux options ne sont pas directement comparables aux carburants fossiles si l'on considère, pour la voie allothermique, un apport d'hydrogène par électrolyse alcaline. Par contre, la voie allothermique peut présenter des coûts de production raisonnables si l'hydrogène apporté est produit par reformage du gaz naturel. Ce procédé reste le plus compétitif encore aujourd'hui. Néanmoins, cette solution n'est pas viable à long terme dans un contexte de développement durable où la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et l'économie des ressources fossiles sont une priorité. L'apport d'hydrogène produit par

électrolyse alcaline, à partir d'une électricité décarbonée, sera alors indispensable. En tenant compte des perspectives de hausse du prix du baril, la compétitivité économique de cette voie est envisageable à moyen terme au prix de l'électricité actuel en France.

## Pas une mais un ensemble de solutions, à envisager dans une dynamique longue

Le seul critère « rendement énergétique » apparaît donc comme très insuffisant pour juger du potentiel d'une filière. Au-delà de ceux précédemment cités on peut ajouter l'indépendance énergétique, à laquelle les biocarburants pourront également contribuer en permettant de se substituer aux importations de gazole.

Il n'existe pas de solution unique ni de filière miracle mais un ensemble de solutions sera à mettre en œuvre en fonction des contextes divers, et cet ensemble évoluera au cours du temps. Dans ce panel, les biocarburants 1G et 2G auront leur rôle à jouer : la 1G dès aujourd'hui, à condition de respecter les certifications mises en place pour garantir une certaine pérennité ; la 2G à plus long terme avec des enjeux en termes de ressources et de compétitivité économique, et aussi la possibilité offerte de stocker de l'électricité décarbonée. L'évolution du contexte réglementaire et économique sera la clé, et le moteur, de la dynamique.



## Effacité énergétique et compétitivité économique

### *Témoignage sur un procédé de production massive d'hydrogène*

par *Alain LE DUIGOU* et *Christine MANSILLA*

Le rendement est généralement le premier critère d'appréciation d'un procédé. On s'aperçoit cependant qu'il faut dès que possible aller au-delà pour juger de son intérêt, notamment en termes de compétitivité économique.

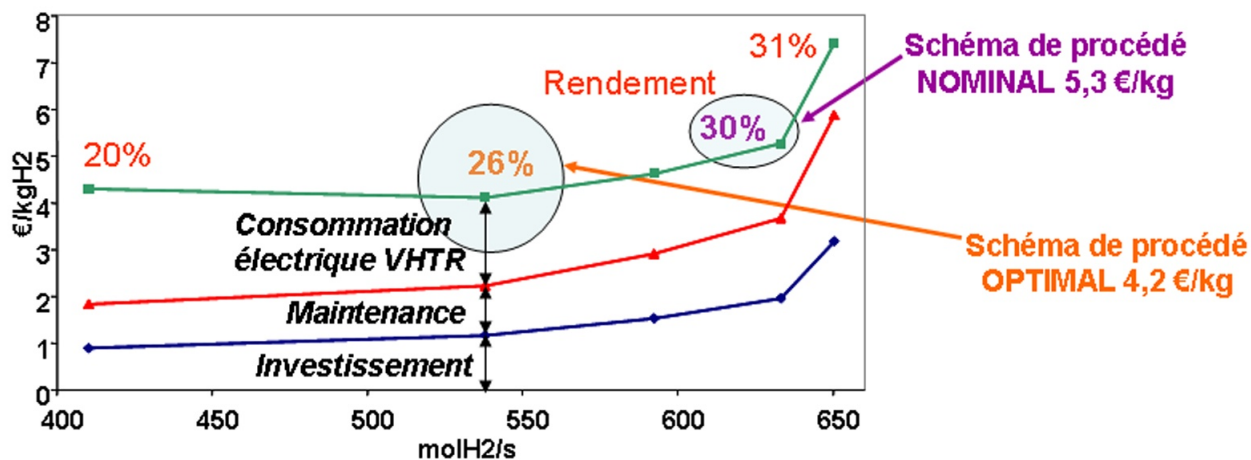
L'utilisation de l'hydrogène pour des applications mobiles et stationnaires, notamment en piles à combustible à moyen terme, peut représenter un marché très important dans les décennies à venir. A titre d'exemple, le passage à l'hydrogène de la flotte mondiale de véhicules légers conduirait à tripler la production totale actuelle (plus de 60 millions de tonnes par an aujourd'hui, tous usages confondus). Par ailleurs, la production d'hydrogène est aujourd'hui essentiellement faite à partir de reformage du méthane, technique la moins chère mais en même temps fortement émettrice de gaz à effet de serre (environ 10 kg de CO<sub>2</sub> par kg d'H<sub>2</sub> produit). La production d'hydrogène par électrolyse alcaline est certes une solution plus durable si l'énergie électrique qui l'alimente est décarbonée, dans la mesure où elle ne consomme pas de ressources fossiles et ne génère pas de gaz à effet de serre, mais elle reste aujourd'hui sensiblement plus chère que le reformage. C'est ce qui a motivé depuis le début des années 2000 un élan de recherche de solutions de substitution moins coûteuses, et pouvant présenter un **meilleur rendement énergétique** par l'utilisation directe de chaleur à haute température que peuvent notamment délivrer des réacteurs nucléaires de génération 4 : l'électrolyse haute température de la vapeur d'eau (gain sur la tension d'électrolyse), les cycles thermochimiques (effets d'échelle intéressants) et les cycles dits hybrides (combinaison de réactions thermochimiques et d'électrolyse à une tension plus faible que celle de l'électrolyse alcaline). Le cycle thermochimique I-S (Iode-Soufre) est probablement celui qui a fait l'objet de plus de R&D et de démonstrations dans la décennie passée (Etats-Unis, Japon, France en particulier). On développe ici un aspect de l'évaluation technico-économique de ce procédé réalisée dans le cadre du projet européen

HYTHEC (2004 - 2008 / 6 partenaires, coordonné par le CEA), qui **met en relation les aspects d'efficacité énergétique et d'économie de ce procédé**.

Le cycle I-S est un procédé qui permet d'extraire l'hydrogène et l'oxygène de l'eau à partir de réactions chimiques à températures élevées pour certaines d'entre elles, en mettant en jeu de l'iode et du soufre. La décomposition de l'acide sulfurique pour en extraire l'oxygène a besoin de chaleur à température élevée (850°C), celle justement que peut fournir un réacteur nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération de type VHTR. C'est une configuration de couplage direct, en système isolé, entre le cycle I-S et un réacteur nucléaire VHTR qui a été étudiée dans ce projet, configuration largement reprise dans les études réalisées au niveau international.

**Efficacité énergétique : de quel "rendement" parle-t-on ?**

La définition du rendement énergétique d'un procédé est un débat récurrent auquel n'a pas échappé le consortium HYTHEC. Les partenaires ont ainsi dû élaborer un document destiné à clarifier les hypothèses et modes de calcul de l'efficacité énergétique du procédé I-S, rendu nécessaire par les différences d'appréciation inhérentes à la diversité des équipes (universités, centres de recherche, ingénieries). Une première valeur du rendement du procédé a ainsi pu être calculée sur la base d'un schéma "de référence" : 37%, valeur obtenue en considérant le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, rapporté à la quantité totale de chaleur et d'électricité qu'il a fallu pour le produire (et en considérant un rendement électricité / chaleur de 50%). Cependant, si l'on prend en compte l'ensemble du système couplé au réacteur nucléaire, en



Evolution du coût de production d'hydrogène par le cycle I-S en fonction du rendement énergétique du procédé couplé à un réacteur nucléaire VHTR (projet HYTHEC)

considérant la chaleur sortant du réacteur comme étant la source d'énergie primaire du système, la valeur chute à 30% du fait des efficacités réelles des divers dispositifs de transfert d'énergie (circulateurs et compresseurs de fluides caloporteurs, production d'électricité, équilibrages thermiques, etc.). Cet écart entre les deux valeurs de rendement obtenues témoigne de l'importance du mode de calcul de l'efficacité énergétique, en particulier des limites du système étudié.

## Efficacités énergétiques et coûts du cycle I-S

A l'instar de beaucoup d'autres procédés, le cycle I-S met en jeu des réactions chimiques qui ont des besoins énergétiques, et d'autres qui sont capables d'en céder. Des gains en efficacité seront obtenus si l'on utilise au mieux les échanges d'énergie au sein du procédé, et que l'on fait ainsi moins appel aux apports d'énergie externe. C'est ce que font les échangeurs récupérateurs, notamment dans la section du cycle qui produit l'hydrogène, où ils représentent plus de 80% de l'énergie échangée, et aussi environ 50% du coût d'investissement total du procédé (résultats HYTHEC). Les rendre plus efficaces entraîne à la fois une réduction de l'apport externe d'énergie, donc une réduction des coûts de fonctionnement, et un accroissement de leurs surfaces, ce qui augmente l'investissement. L'optimum économique peut dans ces conditions différer de l'optimum de rendement.

Un tel optimum a effectivement été trouvé pour le cycle I-S. La figure ci-dessus montre qu'à partir du schéma de procédé initial correspondant à un rendement couplé au réacteur de 30% et à un coût de production d'hydrogène de 5,3€/kg, le dimensionnement des composants du système, et en particulier des échangeurs récupérateurs dont il est question plus haut, a permis, eu égard à l'impact du

coût de ces composants, de réduire le coût de production total de 20%, le rendement énergétique de l'ensemble s'établissant alors à 26%.

Suivant le dimensionnement d'ensemble du système, on note qu'à coût de production pratiquement identique, le rendement peut varier entre 20 et 26%, mais aussi qu'au-delà de 30% chaque point de rendement gagné peut se traduire par un accroissement très sensible du coût.

Cette analyse souligne également l'importance d'une bonne connaissance des coûts des réacteurs et de l'uranium à long terme, et le fait qu'il faut légitimement se poser la question de produire plus ou à moindre coût lorsqu'on dispose d'une énergie primaire en quantité limitée.

Cette étude illustre l'importance des analyses d'ensemble des procédés industriels couplés à leur source d'énergie, tant sur le plan de l'efficacité énergétique que sur celui du coût. Partant des constats que l'évaluation de l'efficacité énergétique est un canal d'entrée rapidement accessible et donc logiquement privilégié en début de R&D, et que les calculs de rendements font toujours l'objet de débats virulents au sein des communautés scientifiques et industrielles, il est primordial d'en définir précisément les hypothèses, frontières et modes de calcul. Il est également tout aussi crucial de développer **au plus tôt** les angles de vue qui ne relèvent pas uniquement de la technique, des rendements, par exemple **l'économie**, afin d'identifier la meilleure configuration d'ensemble ainsi que les sensibilités et marges de manœuvre autour de celle-ci.

## Efficacité et solaire photovoltaïque

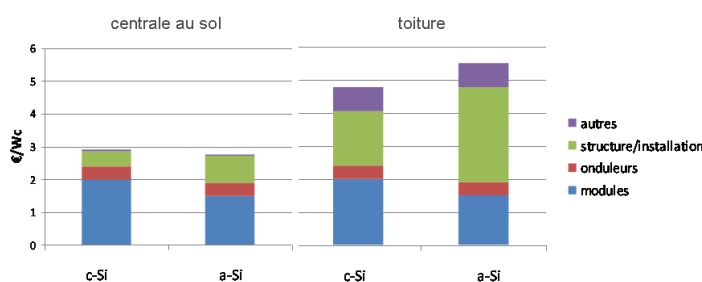
par *Sophie AVRIL, Christine MANSILLA et Françoise THAIS*

L'efficacité du solaire photovoltaïque ne doit pas s'envisager sous un angle uniquement technique. Les politiques mises en œuvre doivent aussi démontrer la leur quand, au niveau environnemental, le bilan du photovoltaïque est à nuancer selon les filières.

Le rôle des énergies renouvelables s'amplifie sur la scène internationale, avec les programmes de développement mis en œuvre à travers le monde pour contribuer à relever les défis énergétiques de demain. Poussée par de fortes ambitions, la Chine est récemment arrivée au pied du podium des pays les plus attractifs en matière d'investissements dans les énergies renouvelables. Le photovoltaïque (PV) connaît ainsi un développement fulgurant depuis plusieurs années. Mais comment cette technologie s'évalue-t-elle à l'aune du critère efficacité, décliné sous les aspects technique bien sûr, mais également environnemental et allant jusqu'à l'efficacité économique des politiques mises en œuvre ?

### L'efficacité technique du solaire photovoltaïque ne se limite pas à son rendement

La course au rendement observée dans les laboratoires de recherche peut de prime abord susciter l'étonnement pour une énergie dont la ressource, le photon, est illimitée. Les considérations de surfaces occupées, que l'on soit dans des applications de pointe telles les avions solaires<sup>1</sup> ou dans des applications grand public comme les installations en toiture, expliquent cette compétition effrénée. Faut-il pour autant éliminer les technologies présentant les moins bons rendements ? La réponse est loin d'être définitive. En effet, d'autres critères entrent également en jeu, parmi lesquels la dégradation des performances au cours du temps ou encore le prix des cellules.

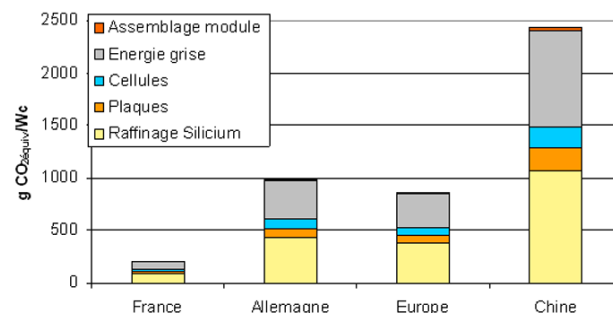


Un prix du module plus faible peut rapidement être compensé par des coûts de structure élevés

Néanmoins, un prix du module plus faible peut rapidement être compensé par des coûts de structure élevés et il est évidemment nécessaire d'adapter la technologie à l'application. Ainsi, le graphe ci-avant illustre bien que, pour une application centrale au sol, le silicium amorphe (a-Si) demeure moins cher que le silicium cristallin (c-Si) alors que, pour une application toiture, son prix de module inférieur ne suffit plus eu égard aux autres postes de coût.

### De l'importance du lieu de fabrication des cellules sur les émissions de CO<sub>2</sub>

En plus de sa ressource abondante, le solaire photovoltaïque est également promu du fait de sa faible contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Des nuances doivent toutefois être apportées.



### Impact environnemental des étapes de fabrication d'un module PV en fonction du mix électrique (L'énergie grise comprend l'énergie requise pour le verre, l'aluminium, etc.)

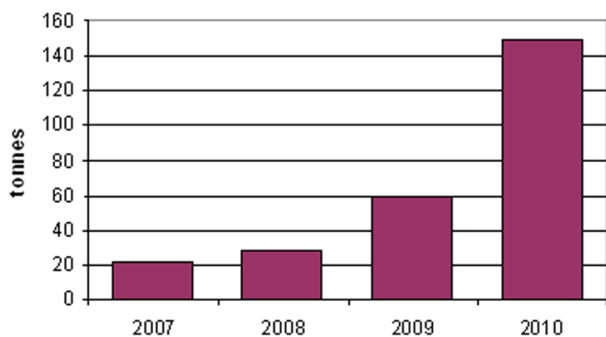
Ainsi, si l'on s'intéresse à la fabrication d'un module c-Si, en considérant successivement les étapes de raffinage et de cristallisation du silicium, de mise en forme des plaques, de fabrication des cellules et enfin d'assemblage des modules, les émissions de CO<sub>2</sub> sont très différentes selon que la fabrication a lieu dans un pays au mix électrique très peu carboné (cas de la France), ou, comme cela est majoritairement le cas aujourd'hui, en Chine dont la production électrique se fait principalement à partir de charbon. Ainsi, les

<sup>1</sup> L'envergure de l'avion SOLAR IMPULSE qui a décollé le 4 avril 2010 est de l'ordre de celle de l'A380

émissions générées lors de la fabrication d'un panneau peuvent varier d'un facteur dix selon le lieu de fabrication, l'impact du transport étant négligeable.

## Utilisation des ressources naturelles : vers une crise de l'indium ?

S'il est vrai que la ressource énergétique d'un panneau solaire en fonctionnement, l'énergie solaire, est abondante, les matériaux de fabrication peuvent quant à eux être plus limités. Ainsi, pour ne citer qu'elle, l'offre d'indium, métal rare utilisé dans une des technologies de type « couches minces », est fortement contrainte. Sous-produit de l'extraction du zinc, sa production est aujourd'hui limitée à 600 tonnes par an. Par ailleurs, il ne semble pas aisé de trouver de nouveaux gisements et les réserves ont été estimées à une dizaine d'années par l'US Geological Survey. Enfin, il existe une certaine opacité des filières d'approvisionnement à laquelle s'ajoute la fixation stratégique de quotas à l'export par le plus gros producteur, à savoir la Chine. En parallèle de cette offre contrainte, la demande est quant à elle en pleine croissance, que ce soit dans le cadre du développement de la filière photovoltaïque ou dans celui des écrans plats dont l'indium fait partie des matériaux constitutifs. Une crise pourrait par



Demande d'indium pour le PV (source : BRGM)

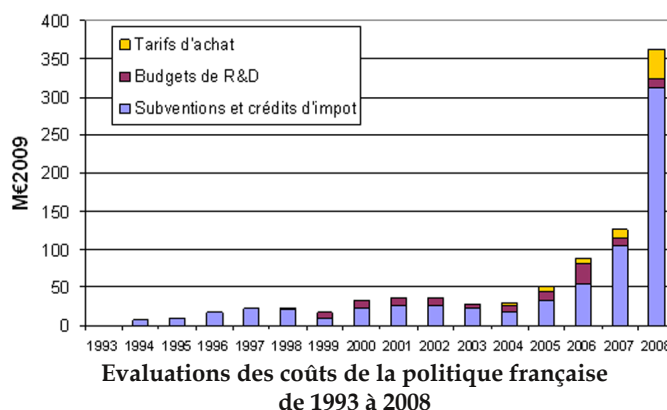
conséquent avoir lieu du double fait du risque de pénurie et de montée des cours. Des solutions existent néanmoins. On pense bien sûr au recyclage, mais également à la sécurisation des approvisionnements (diversification, achats long terme et stockage) et aux produits de substitution comme le graphène, cristal de carbone nano-technologique.

## Les aides françaises au développement de la filière ont été en faveur de la demande

L'inconvénient majeur des technologies PV actuelles réside malgré tout dans son coût qui ne lui permet pas encore d'être compétitif avec les autres moyens de production électrique. A l'heure actuelle, le coût du kWh produit par un système photovoltaïque en France est de l'ordre de 20 à 30 c€ (installation au sol),

alors que le prix de l'électricité est voisin de 7 c€ pour les entreprises (hors TVA), et de 12 c€ pour les particuliers (TTC). Le développement de la filière doit donc être aidé, par des mesures agissant à la fois sur l'offre (subvention de la R&D et soutien aux industriels) et sur la demande (tarifs d'achat, crédits d'impôt, TVA réduite, etc.).

En France les premières aides apparaissent au début



des années 90 avec la mise en place d'aides à l'installation de systèmes PV *off-grid*, solutions alternatives à un raccordement au réseau dont le coût est parfois très élevé. Ce n'est qu'à partir de 1999 que les aides pour le *on-grid* sont décidées. Ces subventions sont remplacées en 2005 par des crédits d'impôts dont l'existence est assurée jusqu'en 2012. Les tarifs d'achat ont quant à eux été mis en place à partir de 2002 pour faire écho à la programmation pluriannuelle des investissements (PPI) de la même année. Revus à la hausse en 2006, ils ont fait l'objet de vives critiques et ont finalement été fixés en légère baisse début 2010. Pour autant, les crédits d'impôt représentent aujourd'hui la plus grande part des dépenses (86%) devant les tarifs d'achats (10%) et enfin les aides à la R&D. Cette prédominance doit être contrebalancée par les futurs coûts des tarifs d'achat. Ces coûts, répercutés sur la facture d'électricité<sup>2</sup>, pourraient s'élever à environ 1,5 Mds d'€ par an si les objectifs de 5400 MWc en 2020 (Grenelle 2007 et PPI 2009) étaient atteints.

Les moyens pour promouvoir le développement de la filière PV en France se sont portés majoritairement sur les aides en faveur de la demande (subventions, crédits d'impôts et tarifs d'achat). A l'avenir, une aide plus importante sur l'offre pourrait être envisagée. Elle pourrait prendre la forme d'actions ciblées d'aides à la R&D.

<sup>2</sup> via la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE)