



# Colloque du printemps 2015

Mercredi 27 mai

# Énergies :

## état des lieux et perspectives

*Muséum, 6 rue Marcel Proust - 45000 Orléans*

*De 9 h à 18 h*



# Énergies : état des lieux et perspectives

## Avant-propos

Cette année l'Académie d'Agriculture, Sciences, Belles-Lettres et Arts d'Orléans propose un colloque sur l'énergie dont vous trouverez le programme ci-dessous. Il n'est pas question de faire en une journée et huit interventions le tour de la question. Mais il nous a semblé qu'il était utile de faire le point sur certaines interrogations qui inquiètent beaucoup de nos concitoyens sans qu'ils aient toujours les moyens d'y répondre par eux-mêmes.

C'est précisément une des missions essentielles de nos académies de contribuer à la réflexion sur les questions essentielles qui se posent à notre société. Notre compagnie, dans sa composition pluridisciplinaire, permet à la fois de faire des constats argumentés et de proposer des pistes de recherche pour l'avenir. Elle contribue ainsi, pour sa modeste part, à une prise de conscience qui veut dépasser les stéréotypes qui courent facilement les rues et les médias sans pour autant apporter un supplément de connaissance et d'analyse la plus objective possible.

D'autres thèmes seront abordés dans les années qui viennent. L'an prochain, au mois de mai 2016, nous nous pencherons sur la situation de la langue française, nous pensons aussi au rôle de l'entreprise dans le monde d'aujourd'hui, et par ailleurs nous impulsions cette année une réflexion sur l'évolution du savoir dans notre société, comment il se transforme, se transmet, et quelles valeurs il peut véhiculer dans l'avenir face aux changements, voire aux mutations, qui se dessinent,

Je dis toute ma reconnaissance à ceux d'entre nous qui collaborent à cette entreprise et vous remercie de l'intérêt que vous voudrez bien porter à nos travaux.

**Marc Baconnet**

Président de l'Académie d'Orléans

# Énergies : état des lieux et perspectives

## Remerciements

Au cours des dernières années, l'Académie d'Orléans a organisé une série de colloques orientés vers des sujets scientifiques modernes et/ou classiques. Ces colloques ont lieu au mois de mai et sont appelés « Colloques du printemps de l'Académie ». Successivement, les thèmes ont été les suivants : L'agriculture dans le Loiret en 2008 ; L'évolution biologique en 2009 ; La révolution numérique : libération ou aliénation en 2010 ; De la terre aux étoiles : l'univers revisité en 2011 ; Génétique et liberté en 2012 ; Les défis économiques du 21<sup>e</sup> siècle en 2013. En 2014, Il n'y a pas eu de colloque de printemps car l'Académie d'Orléans a organisé la Conférence nationale des Académies en octobre.

En 2015, dans la perspective de la sensibilisation au problème du réchauffement climatique et compte tenu de la réunion internationale (COP 21) à Paris en décembre, l'Académie s'est proposé d'organiser un colloque sur les énergies. Ce thème a été accepté par le conseil d'administration sous la présidence de monsieur Marc Baconnet. Nous remercions tous les membres de l'Académie qui ont aidé à la préparation du colloque en apportant leur contribution pour sélectionner les thèmes les plus porteurs, en proposant des personnalités scientifiques de premier plan et en prenant contact avec eux. Tous les conférenciers pressentis ont accepté.

Nous remercions monsieur Xavier Benoist, directeur du Muséum, de nous avoir accueillis pour la journée dans l'amphithéâtre du 4<sup>e</sup> étage.

Nous remercions les conférenciers d'avoir accepté de participer à ce colloque, de donner un court CV et un résumé succinct qui ont permis de soutenir la publicité pour ce colloque et enfin de d'écrire un résumé détaillé. Ces résumés sont rassemblés sous la forme de ce présent fascicule.

Nous remercions tous les membres de l'Académie et les membres de l'association « les Amis de l'Académie » qui ont participé au colloque en tant qu'auditeurs. Nous remercions tous ceux qui ont contribué à son bon déroulement, et en particulier monsieur Christian Loddé, secrétaire général de l'Académie.

Nous remercions les nombreux auditeurs qui, en assistant au colloque, montrent que les énergies au XXI<sup>e</sup> siècle sont l'objet d'une préoccupation majeure pour nombre d'entre nous.

*Les enregistrements vidéo des conférences seront disponibles sous forme d'un DVD (10 €, frais de port inclus). Veuillez adresser votre commande à monsieur Christian Loddé, Secrétaire Général de l'Académie, 5, rue Antoine Petit, 45000 Orléans.*

**Michel Monsigny**  
Membre de l'académie, coorganisateur



5, rue Antoine Petit - 45000 Orléans

# Colloque du printemps 2015

*Au Muséum, 6 rue Marcel Proust - 45000 Orléans*

## Énergies : état des lieux et perspectives

<b>Horaire</b>	<b>Titres</b>	<b>Conférenciers</b>	<b>Page</b>
<i>9 h</i>	<i>Bienvenue</i>	Marc Baconnet	
<i>9 h 15</i>	<i>Energie et réchauffement climatique</i>	Paul Mathis <a href="mailto:mathis.paul@orange.fr">mathis.paul@orange.fr</a>	9
<i>10 h</i>	<i>Les réseaux intelligents (smart grids) : l'électricité au cœur de la transition énergétique</i>	Jean-François Quinchon <a href="mailto:jean-francois.quinchon@erdf.fr">jean-francois.quinchon@erdf.fr</a>	12
<i>10 h 45</i>	<i>Pause</i>		
<i>11 h 15</i>	<i>La transition énergétique et la géothermie</i>	Jacques Varet <a href="mailto:jacques.varet@gmail.com">jacques.varet@gmail.com</a>	14
<i>12 h</i>	<i>L'énergie nucléaire en questions</i>	Jean-Marie Lecocq <a href="mailto:jmlecocq@laposte.net">jmlecocq@laposte.net</a>	17
<i>12 h 45</i>	<i>Déjeuner</i>		
<i>14 h 30</i>	<i>Energies, matériaux, chimie ... de la biomasse à la bio-économie !</i>	Claude Roy <a href="mailto:claudio.roy01@agriculture.gouv.fr">claudio.roy01@agriculture.gouv.fr</a>	21
<i>15 h 15</i>	<i>L'électricité : son transport et son stockage : hier, aujourd'hui et demain</i>	Gérard Besson <a href="mailto:gbesson@neuf.fr">gbesson@neuf.fr</a>	24
<i>16 h</i>	<i>Pause</i>		
<i>16 h 30</i>	<i>L'optimisation énergétique des véhicules</i>	Michel Mudry <a href="mailto:michel.mudry@free.fr">michel.mudry@free.fr</a>	28
<i>17 h 15</i>	<i>Transition énergétique: un nouveau modèle de croissance ?</i>	Jean-Marie Chevalier <a href="mailto:jean-marie.chevalier@dauphine.fr">jean-marie.chevalier@dauphine.fr</a>	32
<i>18 h</i>	<i>Conclusions</i>	Marc Baconnet	

*Entrée libre*



**9 h 15 Energie et réchauffement climatique**

**Paul Mathis**

Ingénieur agronome, docteur ès sciences physiques. Ancien président de la Société française de photobiologie et de la Société internationale de photosynthèse.

Intérêts particuliers : biomasse, transports. Auteur de livres grand public sur les énergies aux

éditions **Le Pommier** : « *Pourquoi les feuilles sont-elles vertes ?* », « *Les énergies renouvelables ont-elles un avenir ?* », « *Quel avenir pour les biocarburants ?* », et **Quae** : « *Les énergies. Comprendre les enjeux* », « *La Biomasse, énergie d'avenir ?* », « *L'énergie, moteur du progrès ?* »

[mathis.paul@orange.fr](mailto:mathis.paul@orange.fr)

Les énergies ont toujours tenu une place essentielle dans les progrès socio-économiques de l'humanité. Toutefois, basées essentiellement sur les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), leur contribution au progrès montre ses limites car elles émettent du CO<sub>2</sub>, responsable majoritaire d'un réchauffement climatique qui menace toute la planète.

Après un rappel sur les énergies, leur histoire et leur place dans les sociétés modernes, le conférencier abordera la question de la transition énergétique : comment concilier les besoins inéluctables en énergie, et même des besoins croissants dans les pays en développement, avec la nécessité impérieuse de consommer progressivement beaucoup moins de combustibles fossiles ? Pour la France, l'objectif est de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050.

Les outils techniques ne manquent pas pour améliorer l'efficacité énergétique et disposer d'énergies non carbonées (énergies renouvelables, nucléaire). Mais à quel prix, à quel rythme, avec quelles priorités ? Dans ce contexte, le conférencier invitera les auditeurs à résister aux discours simplificateurs et à la pression des médias ou de la publicité.



**10 h Les réseaux intelligents (smart grids) : l'électricité au cœur de la transition énergétique**

**Jean-François Quinchon**

Directeur régional Centre d'ERDF  
Ingénieur civil des ponts et chaussées  
Ancien élève de l'École polytechnique

[jean-francois.quinchon@erdf.fr](mailto:jean-francois.quinchon@erdf.fr)

Pour faire face aux mutations du paysage énergétique, il est nécessaire de moderniser le système électrique. Le contexte français et européen, dans lequel se sont développés les réseaux électriques, conduit à privilégier le déploiement de technologies *smart grids* plutôt que le remplacement et le renforcement massif des réseaux.

Le système électrique sera ainsi piloté de manière plus flexible pour gérer les contraintes telles que l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tel que le véhicule électrique.

Ces contraintes auront également pour effet de faire évoluer le système actuel, où l'équilibre en temps réel est assuré en adaptant la production à la consommation, vers un système où l'ajustement se fera davantage par la demande, faisant du consommateur un véritable acteur.



### **11 h 15** *La transition énergétique et la géothermie*

#### **Jacques Varet**

Docteur en sciences de la terre (1973),  
Ancien chef du département **géothermie** du BRGM  
Directeur du service géologique national et  
Fondateur de la compagnie française de géothermie  
Chef du département énergie, ressources minérales  
et technologies de l'environnement au ministère de  
la recherche (ministère H.Curien, 1989-1992)  
Président du CESMAT, centre d'études supérieures  
des matières premières (2009-2013)  
Fondateur au sein du BRGM en 2010 de l'ENAG :  
école nationale d'application des géosciences

[jacques.varet@gmail.com](mailto:jacques.varet@gmail.com)

La transition énergétique s'impose à nous de manière inéluctable. Nous sommes « coincés des deux bouts » : d'une part les émissions de gaz à effet de serre provenant de la combustion des fossiles (le  $\frac{3}{4}$  des consommations mondiales d'énergie) deviennent intolérables du fait de leur impact climatique. D'autre part, ces ressources fossiles sont par nature limitées, et nous devons affronter le « pic ». Enfin, ne vaut-il pas mieux utiliser ces précieux hydrocarbures pour leurs nombreuses applications chimiques et médicales ?

La mutation est difficile tant nous sommes « drogués » d'énergie abondante et à bon marché - à laquelle la politique nucléaire française a contribué à nous accoutumer - au lieu de nous préparer au changement inéluctable qui doit reposer sur les énergies renouvelables, la maîtrise de l'énergie et la sobriété énergétique.

Parmi les orientations fondamentales, privilégier le recours aux ressources locales et les usages au niveau optimal. Ainsi près de la moitié des consommations énergétiques en Région Centre répond à des besoins de basse température (chauffage et eau chaude sanitaire) auxquels la géothermie peut parfaitement répondre en assurant le « facteur 4 ». Or la France reste à la traîne dans ce domaine ! De même, certaines régions du monde recèlent des ressources (on présentera l'exemple de l'Afrique de l'Est) qui les placent en position de pôles de développement planétaire. Comment en être absent ?



### **12 h** *L'énergie nucléaire en questions*

#### **Jean-Marie Lecocq**

Diplômé de l'INSTN de Saclay en  
Physique des Réacteurs Nucléaires. Chez  
Framatome dès 1969 : responsable de la  
Conception et essais de démarrage des  
cœurs de réacteurs.  
Services d'ingénierie et maintenance  
Stratégie et audit.

[jmlecocq@laposte.net](mailto:jmlecocq@laposte.net)

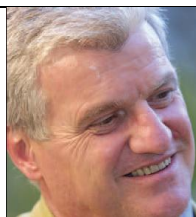
Comment s'est construit le parc nucléaire français ?  
Quand arrêter définitivement les centrales ?  
Quand et comment démanteler les centrales ?

Dépendance vis à vis des ressources d'uranium  
EPR compliqué, difficile à construire  
Leçons tirées de Fukushima

Industrie dangereuse et risquée pour le public.

Qui fait la maintenance des centrales ?  
Que fait-on des déchets nucléaires ?  
Quel est l'avenir de la production nucléaire  
d'électricité ?

Regards extérieurs : Allemagne, Japon



**14 h 30 Energies, matériaux, chimie ...  
de la biomasse à la bio-économie!**

**Claude Roy**

Ingénieur général des ponts des eaux et des forêts

Ancien directeur exécutif de l'ADEME

Président du club des bio-économistes

Membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux

[claude.roy01@agriculture.gouv.fr](mailto:claude.roy01@agriculture.gouv.fr)

La biomasse (agriculture, forêt, filières aval et bio-déchets), est valorisable sous forme d'aliments, de fertilisants organiques, de matériaux, de bases chimiques, ainsi que dans des énergies variées comme les bio-carburants, les gaz, la chaleur ou l'électricité.

Toutes ces bio-filières, renouvelables, sobres et créatrices d'emplois, se développent massivement dans le cadre d'une nouvelle économie bio-sourcée, la bioéconomie.

L'exposé de Claude Roy abordera les enjeux de la bioéconomie en montrant comment elle peut permettre d'amortir le tarissement annoncé des réserves d'hydrocarbures, de limiter le réchauffement climatique et de faire face globalement aux besoins fondamentaux de nos sociétés.



**15 h 15 L'électricité : son transport et son stockage : hier, aujourd'hui et demain**

**Gérard Besson**

Docteur-ès sciences physiques (1980),  
Professeur des universités (1987).  
Président de l'université d'Orléans (2002-2004).

**Recteur de l'académie de Clermont-Ferrand, chancelier des universités de 2004 à février 2012.**

[gbesson@neuf.fr](mailto:gbesson@neuf.fr)

Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, on sait transporter de grandes quantités d'énergie sous forme de [courant électrique](#), mais non sans d'importantes « pertes en ligne » sur les grandes distances.

- 78% des pertes proviennent de la déperdition d'énergie qui s'opère dès qu'un courant circule dans le matériau conducteur. On appelle cette dissipation sous forme de chaleur : [effet joule](#)

- Les conditions climatiques impactent également le volume des pertes dont 8% sont liées à une décharge électrique entre l'air et le conducteur.

- Environ 11% des pertes sont liées au passage du courant dans les [postes de transformation](#) de niveau de tension.

- Enfin les postes électriques eux-mêmes nécessitent une consommation d'énergie d'environ 3%. Sur le réseau de transport de l'électricité, les pertes totales ont représenté 10,5 milliards de kWh en 2012.

**Comment réduire les pertes en ligne ? Plusieurs solutions sont possibles :** Utiliser du courant continu ; Augmenter la tension sur la ligne ; Utiliser des câbles blindés, mieux isolés et des métaux opposant moins de résistance au passage des électrons ; Consommer au plus près du lieu de production ;

La [supraconduction](#) est une solution théorique ou utilisée en laboratoire ou dans certaines installations sophistiquées. **Où en sommes nous, est ce une des solutions d'avenir ?**





**16 h 30 L'optimisation énergétique des véhicules**

**Michel Mudry**

Docteur ès sciences physiques de l'UPMC en aérodynamique.

Professeur des universités, physique, mécanique.

Directeur de l'Ecole supérieure de l'énergie et des matériaux (ESEM) d'Orléans (1988 à 1997).

Président de l'université d'Orléans (1997-2002).

[michel.mudry@free.fr](mailto:michel.mudry@free.fr)

On s'intéresse aux véhicules à propulsion autonome, c'est-à-dire porteurs de leur propre système de propulsion. Il s'agit pour l'essentiel des navires, des automobiles et des aéronefs. Il y a deux siècles et demi, la machine à vapeur a donné la première génération de ces véhicules : bateaux à vapeurs et véhicules ferroviaires. La seconde génération fut entièrement fondée sur l'énergie fossile, fournie par le pétrole essentiellement. A partir du premier choc pétrolier on a cherché d'une part à minimiser les consommations de carburant, et de plus à remplacer au moins partiellement cette source énergétique.

On donne les principes et des exemples de cette double quête d'une énergétique – éventuellement hybride – optimisée pour les véhicules de transport: propulsion éolienne des navires (Alcyone), carburants de substitution et propulsion hybride (essence/électricité) en automobile, minimisation de trainée et essai d'hybridation énergétique en aéronautique (e-fan).



**17 h 15 Transition énergétique : un nouveau modèle de croissance?**

**Jean-Marie Chevalier**

Professeur émérite de sciences économiques à l'Université Paris-Dauphine ; Directeur du Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières (CGEMP) jusqu'en 2010. Diplômé de l'Institut d'études politiques de Paris, docteur en sciences économiques (Université Panthéon-Sorbonne) et agrégé des facultés de sciences économiques.

[jean-marie.chevalier@dauphine.fr](mailto:jean-marie.chevalier@dauphine.fr)

Les conséquences économiques de la transition énergétique font l'objet d'appréciations contradictoires. Pour les uns, cela induira une contrainte supplémentaire qui freinera un peu plus la croissance potentielle des économies avancées. Alors que d'autres considèrent que cela entraînera des restructurations et des investissements porteurs de gains de productivité.

L'exposé s'interrogera sur la possibilité de faire émerger un autre modèle de développement respectueux de l'environnement et des ressources naturelles tout en préservant, voire en stimulant, la croissance économique.

# Energie et réchauffement climatique

Paul Mathis<sup>1</sup>

## Dans le rétroviseur

Quand les humains ont découvert le feu, c'est à dire la combustion de la biomasse, ils ont amélioré leurs conditions de vie et lancé un processus continu d'utilisation de plus en plus d'énergie pour répondre à de plus en plus de besoins. Jusqu'en l'an 1900, cela n'a pas posé de problème planétaire ; mais le ver était dans le fruit : on connaissait alors les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) et leur consommation montait en flèche. Le 19<sup>e</sup> siècle a vu grimper la consommation de charbon, le 20<sup>e</sup> siècle celle de pétrole, puis de gaz, tandis que l'hydroélectricité et l'électronucléaire se développaient. Ces énergies ont permis de fantastiques progrès socio-économiques, au moins chez les humains qui en ont bénéficié.

## Energie, CO<sub>2</sub>, réchauffement climatique

Actuellement, les combustibles fossiles répondent à 81% des besoins d'énergie de la planète. Leur usage entraîne une émission inéluctable de dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>. Celui-ci part dans l'atmosphère où il a trois sorts possibles : une partie est absorbée par les océans, une autre par les forêts, et environ la moitié reste dans l'atmosphère où il séjourne un temps de l'ordre du siècle. La concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> augmente donc progressivement ; elle est passée de 295 ppm en 1900 à près de 400 ppm actuellement.

Par des mesures de haute précision sur toute la surface du globe, les météorologistes ont mis en évidence un réchauffement global de la planète, au niveau de l'atmosphère et de la couche superficielle des océans. Il est de l'ordre de 1°C depuis 1900, et il se poursuit, d'une manière claire quoique non régulière. De nombreux laboratoires de météorologie et de physique de l'atmosphère ont établi une chaîne de causalité : combustion de fossiles 1 → accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère 2 → accroissement de l'effet de serre 3 → réchauffement planétaire.

L'étape 1 assigne une cause humaine (anthropique) à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'étape 2 nécessite une bonne compréhension du sort du CO<sub>2</sub> émis par les combustions ; elle est basée sur des mesures de plus en plus précises. Notons aussi que d'autres gaz d'origine anthropique participent à l'effet de serre atmosphérique (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, carbures halogénés, ozone) ; leur contribution est inférieure à celle du CO<sub>2</sub>, mais elle doit être prise en compte.

L'étape 3 est plus délicate. Il est clair que la température moyenne de la surface du globe augmente parallèlement à la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais cette dernière est-elle bien la cause du réchauffement ? Cette causalité est désormais clairement démontrée par les résultats des laboratoires, rassemblés périodiquement par le GIEC<sup>2</sup>. Cette démonstration est délicate car la physique de l'atmosphère est intrinsèquement compliquée, surtout qu'il faut étudier le comportement de toute la planète, inclure les interactions avec les océans (avec ses hétérogénéités, courants, instabilités, etc.), et ne pas oublier le comportement des masses glaciaires, des nuages et de la vapeur d'eau, ni les phénomènes naturels (évolution de l'orbite terrestre, éruptions volcaniques, variations de l'activité solaire, etc.).

Le réchauffement de la planète a de nombreuses conséquences qui sont déjà plus ou moins constatables : fonte des glaciers, élévation du niveau des océans, dérèglement de la pluviométrie, épisodes caniculaires, etc. Elles influent sur l'ensemble de la biosphère.

Les physiciens décrivent un déroulement temporel (GES : gaz à effets de serre, température, niveau des océans, etc.) qui inclut le passé, mais qui fait aussi des prévisions pour l'avenir. Celles-ci incluent les incertitudes dans l'analyse du climat, et surtout dans le comportement des humains : à quel rythme

<sup>1</sup> Ingénieur agronome ; mathis.paul@orange.fr

<sup>2</sup> GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

## Paul Mathis (suite)

vont-ils continuer à utiliser l'atmosphère comme poubelle? Les physiciens établissent donc un ensemble de scénarios qui intègrent ces hypothèses.

### Se projeter dans l'avenir : la transition énergétique

Sur la base des évolutions passées ainsi que des besoins prévisibles, les économistes prévoient que l'usage des combustibles fossiles ne fera qu'augmenter, peut-être jusqu'en 2050. Sur cette base, les scénarios climatiques sont très pessimistes : la température pourrait augmenter de 2°C en 2050 et de 4 à 5°C en 2100, les autres phénomènes évoluant en parallèle (bien que plus lentement pour l'augmentation du niveau des mers).

La communauté internationale a pris conscience du caractère catastrophique de ces scénarios et du fait que des actions doivent être entreprises, même s'il y a de sérieux désaccords quant à la prise en charge du coût de ces actions. Mais il y a au moins accord sur un terme, celui de transition énergétique, et à peu près sur ses objectifs : diminuer par deux, d'ici 2050, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, afin de limiter à 2°C le réchauffement moyen. Cet objectif implique une forte réduction dans les pays développés sachant que les pays en développement ne pourront qu'augmenter leur consommation de fossiles. Pour ce qui la concerne, la France a pris l'engagement de réduire ses émissions de GES d'un facteur 4 d'ici 2050.

Quels sont les outils techniques de la transition énergétique ? Il s'agit de passer d'une économie qui repose essentiellement sur les fossiles à une économie presque totalement décarbonée, et pour ce faire :

- Améliorer l'efficacité énergétique, c'est à dire mieux utiliser l'énergie. De nombreux progrès sont possibles, dans le chauffage des locaux, l'électricité spécifique, les transports, les procédés industriels. Faire mieux avec moins... Notons ici que les progrès effectués dans les pays développés pourront être adoptés par les pays en développement.

- Augmenter les utilisations de l'électricité, dans la mesure où celle-ci peut être facilement (au plan technique !) décarbonée par l'usage des énergies nucléaires et des énergies renouvelables électriques. Remarquons quand même l'ampleur de l'effort à effectuer au plan mondial car l'essentiel de l'électricité est produite à partir de charbon.

- Utiliser plus et mieux les énergies renouvelables thermiques : biomasse, géothermie, chauffage solaire, pompes à chaleur.

Notons aussi l'ampleur de l'effort à effectuer en matière de transports qui reposent essentiellement sur les produits pétroliers, et se développent à toute allure !

La transition énergétique doit être mise en oeuvre rapidement, mais dans une perspective à très long terme, disons 2100. D'ici là les réserves de fossiles d'accès facile auront fortement diminué ; il en est de même pour les réserves d'uranium mais, en matière de nucléaire, les surgénérateurs pourraient être opérationnels (voire peut-être la fusion contrôlée) ; en matière de renouvelables électriques, le coût du solaire et de l'éolien pourrait avoir fortement baissé, de même que celui des procédés de stockage.

Comme on le voit, il y a des inconnues, et donc des besoins de recherche pour améliorer les procédés et les prix de revient. En conclusion, je voudrais attirer l'attention sur trois aspects de la transition énergétique à effectuer :

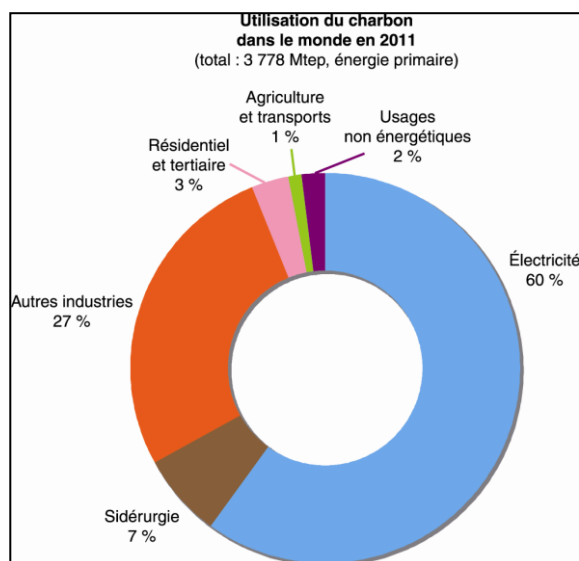
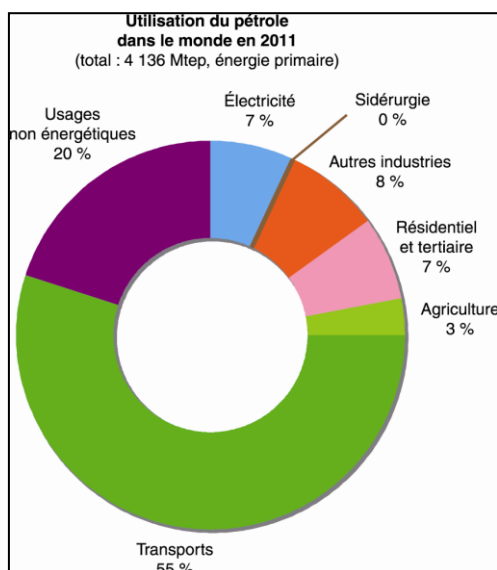
- L'objectif est global, mais les actions sont locales. Chaque pays doit rechercher son meilleur mix énergétique en fonction de sa situation géographique, technologique, etc.
- Il ne faut pas oublier que l'objectif, c'est de réduire les émissions de GES. La planète est loin de manquer d'énergies, mais celles-ci restent chères ou émettrices de CO<sub>2</sub>.
- Attention à ne pas engager de politique (hors recherche) sur la base de solutions incertaines qui pourraient précipiter l'humanité dans la fuite en avant : captage et stockage du carbone, surgénérateurs, stockage massif de l'électricité.

### Références

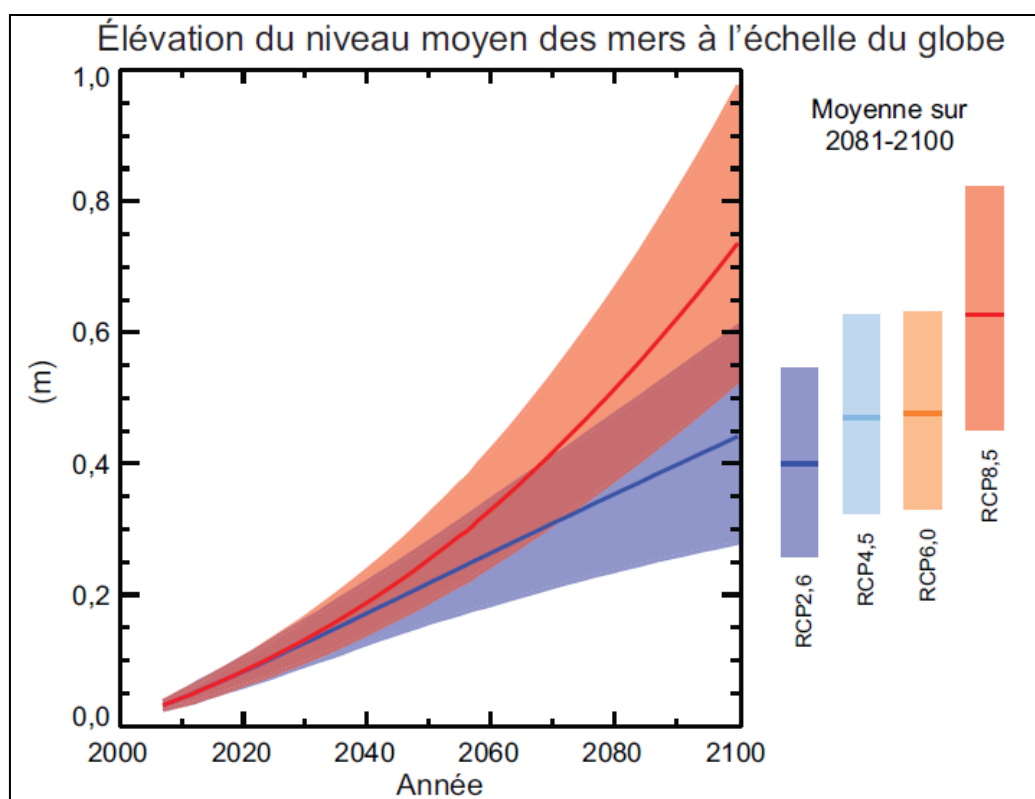
V. Masson-Delmotte. 2011. Climat : le vrai et le faux. Le Pommier  
 P. Mathis. 2014. L'énergie, moteur du progrès ? Quae

## Paul Mathis (suite)

## Figures



Utilisation mondiale du pétrole en 2011 (avec domination par le secteur des transports) et du charbon (avec domination par le secteur de la production d'électricité). (P.Mathis, Quae, 2014).



Evolution du niveau moyen des mers à l'échelle du globe (source : GIEC 2014, résumé pour décideurs). Prévisions pour quatre scénarios de « forçage radiatif » (RCP), c'est à dire d'excédent d'énergie reçue par la surface terrestre en  $W/m^2$ . Noter que le niveau des mers continuerait de monter pendant des siècles après l'an 2100.

## **Les *smarts grids*<sup>3</sup> : l'électricité au cœur de la transition énergétique**

**Jean-François Quinchon<sup>4</sup>**

La France s'engage dans la transition énergétique, et l'électricité sera l'un des premiers vecteurs de cette transition : plus d'énergies renouvelables, pour un réseau plus intelligent. Du fait de l'évolution du mix énergétique avec les énergies renouvelables et l'arrivée de nouveaux usages de l'électricité (les producteurs d'EnR les plus matures étant somme toute des producteurs d'électricité avec l'éolien et le photovoltaïque...), le rôle de pilotage assuré par le réseau de distribution d'électricité se verra renforcé, mais aussi complexifié.

Les énergies renouvelables sont en effet par essence dispersées sur les territoires, leur production est intermittente : il faut donc un réseau de partage de l'énergie, pour les relier aux consommateurs. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication, à travers les smart grids (réseaux intelligents), permettront d'optimiser les flux d'énergie, et d'assurer cet équilibre entre l'offre et la demande.

Cela suppose un réseau de distribution adapté aux fortes variations de production et de consommation pour garantir la continuité de fourniture au meilleur prix à l'ensemble des clients.

Le système électrique devra ainsi être piloté de manière plus flexible pour gérer les contraintes telles que l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tel que le véhicule électrique. Cela aura pour effet de faire évoluer le système actuel, où l'équilibre en temps réel est assuré en adaptant la production à la consommation, vers un système où l'ajustement se fera davantage par la demande, faisant du consommateur un véritable acteur.

Ces évolutions exigent de mettre au point des outils capables d'optimiser en permanence l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité sur le réseau au niveau local.

ERDF a fait le choix des nouvelles technologies pour répondre à ces nouveaux enjeux. Pour préparer dès aujourd'hui ce virage technologique majeur, ERDF s'investit dans de nombreux projets en France et en Europe. Ceux-ci préparent les réseaux de demain, alliance du monde de l'électricité et de celui du numérique.

Sur le réseau moyenne-tension, ERDF a déjà développé des outils « smart » depuis une vingtaine d'années : logiciels de mesure et d'action à distance, fonction d'«auto-cicatrisation» du réseau par voie informatique, etc.

Il s'agit maintenant d'accueillir sur le réseau basse-tension de nouvelles formes de production d'électricité issues des énergies renouvelables. Elles ont la particularité d'être intermittentes. En effet, les éoliennes ne produisent que lorsqu'il y a du vent et les panneaux photovoltaïques ne fonctionnent qu'en plein jour.

Depuis cinq ans, le nombre des producteurs d'énergie photovoltaïque et éolienne raccordés au réseau basse-tension s'est multiplié : en 2014 . Ils devraient être d'un million d'ici 2020. Le réseau doit par conséquent prendre en compte la circulation de l'électricité dans les deux sens : collecter l'électricité produite d'un côté et distribuer celle à consommer de l'autre.

En outre, de nouveaux usages se développent avec la montée en puissance de la mobilité électrique : voiture électrique, véhicule électrique léger, 2 et 3 roues, utilitaires et bus.

**CHIFFRES CLES 2014**  
LES PRODUCTEURS D'ENR EN  
REGION CENTRE-VAL DE LOIRE

Parc éolien installé  
||| | 69 installations raccordées  
||| | soit 791 MW  
Parc photovoltaïque installé  
||| | 10 817 installations raccordées  
||| | soit 171 MW

<sup>3</sup> *Smart grids* : réseaux intelligents

<sup>4</sup> Directeur régional Centre d'ERDF ; jean-francois.quinchon@erdf.fr

### Jean-François QUINCHON (Suite)

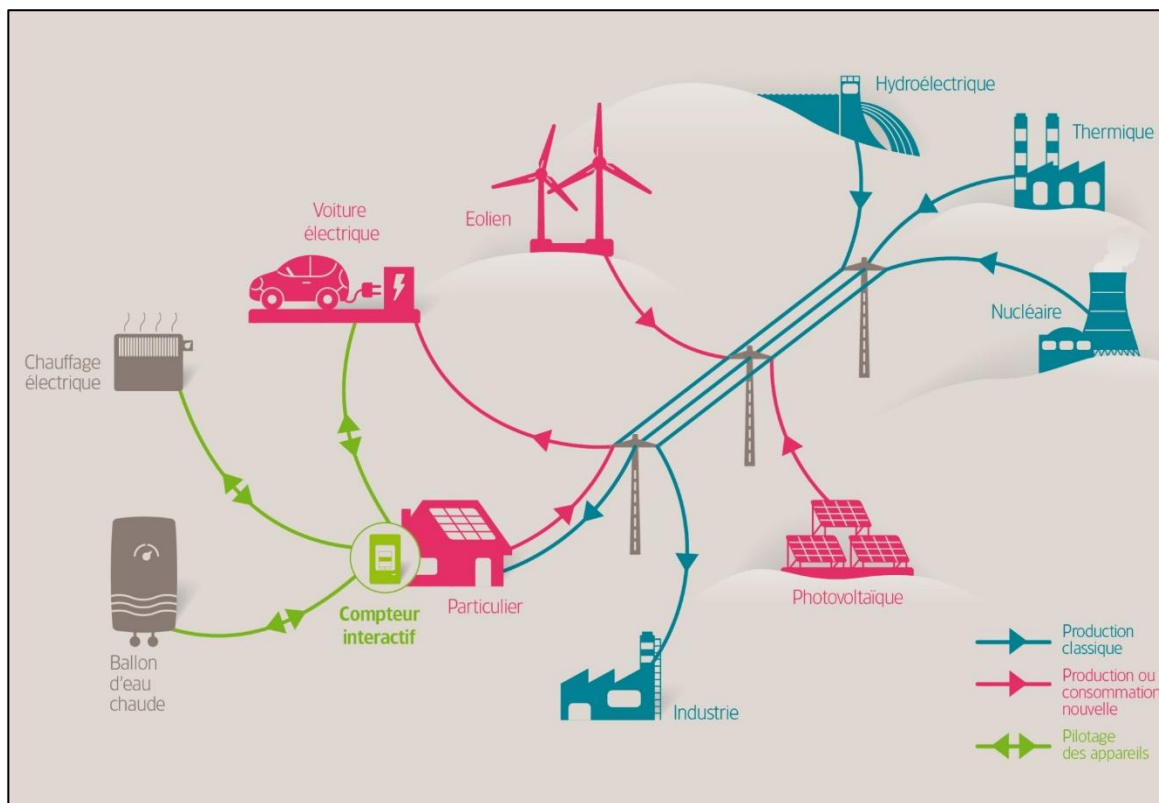
800 000 voitures électriques et hybrides devraient circuler en France en 2020. Un changement qui pourrait engendrer des chutes de tension sur le réseau si tous les véhicules se rechargent au même moment de manière non maîtrisée. La recharge de ces véhicules sera mobile et imprévisible : au domicile du conducteur le soir, au bureau, dans la rue, sur un parking ou même sur la route des vacances.

Il faut savoir qu'une recharge complète normale d'un véhicule électrique représente un appel de puissance équivalent à un chauffe-eau, si la recharge s'effectue en 8 heures. Mais, si elle se fait en accéléré, en une heure, cela représente l'appel de consommation d'un immeuble ! Or, les moyens actuels (démarrage de centrales à gaz ou fioul) pour éviter ces perturbations sur le réseau sont coûteux et émetteurs de CO<sub>2</sub>. Autant de contraintes auxquelles répondent les smart-grids dans la gestion intelligente de la charge.

L'introduction de nouvelles technologies sur le réseau basse-tension va donc améliorer son pilotage (assurer l'équilibre offre/demande d'électricité, détecter les incidents, éviter les temps de coupure, etc.).

En cible, les 35 millions de compteurs nouvelle génération Linky d'ERDF installés sur le territoire français seront autant de capteurs pour aider au pilotage du réseau ainsi qu'à la détection des pannes éventuelles. En outre, le traitement automatisé et sécurisé des données permettra aux fournisseurs d'énergie de développer de nouvelles offres mieux adaptées aux attentes de leurs clients.

De nouveaux services seront également possibles: factures calculées sur la consommation réelle, interventions réalisées à distance (relevé des compteurs, changement de puissance, mise en service...) en moins de 24 heures, réalimentation en électricité plus rapide grâce à un diagnostic facilité, accès sécurisé à ses informations de consommation électrique (via ordinateurs, tablettes, Smartphone, TV...), pilotage à distance d'équipements électriques (chauffage, chauffe-eau, lave-linge...).



Le réseau de demain, un réseau de partage de l'énergie

## La transition énergétique et la géothermie

Jacques Varet<sup>5</sup>

La transition énergétique s'impose à nous de manière inéluctable. Nous sommes « coincés des deux bouts » : d'une part les émissions de gaz à effet de serre provenant de la combustion des fossiles (le  $\frac{3}{4}$  des consommations mondiales d'énergie) deviennent intolérables du fait de leur impact climatique. D'autre part, ces ressources fossiles sont par nature limitées, et nous devons affronter le « pic ». Enfin, ne vaut-il pas mieux utiliser ces précieux hydrocarbures pour leurs nombreuses applications chimiques et médicinales ?

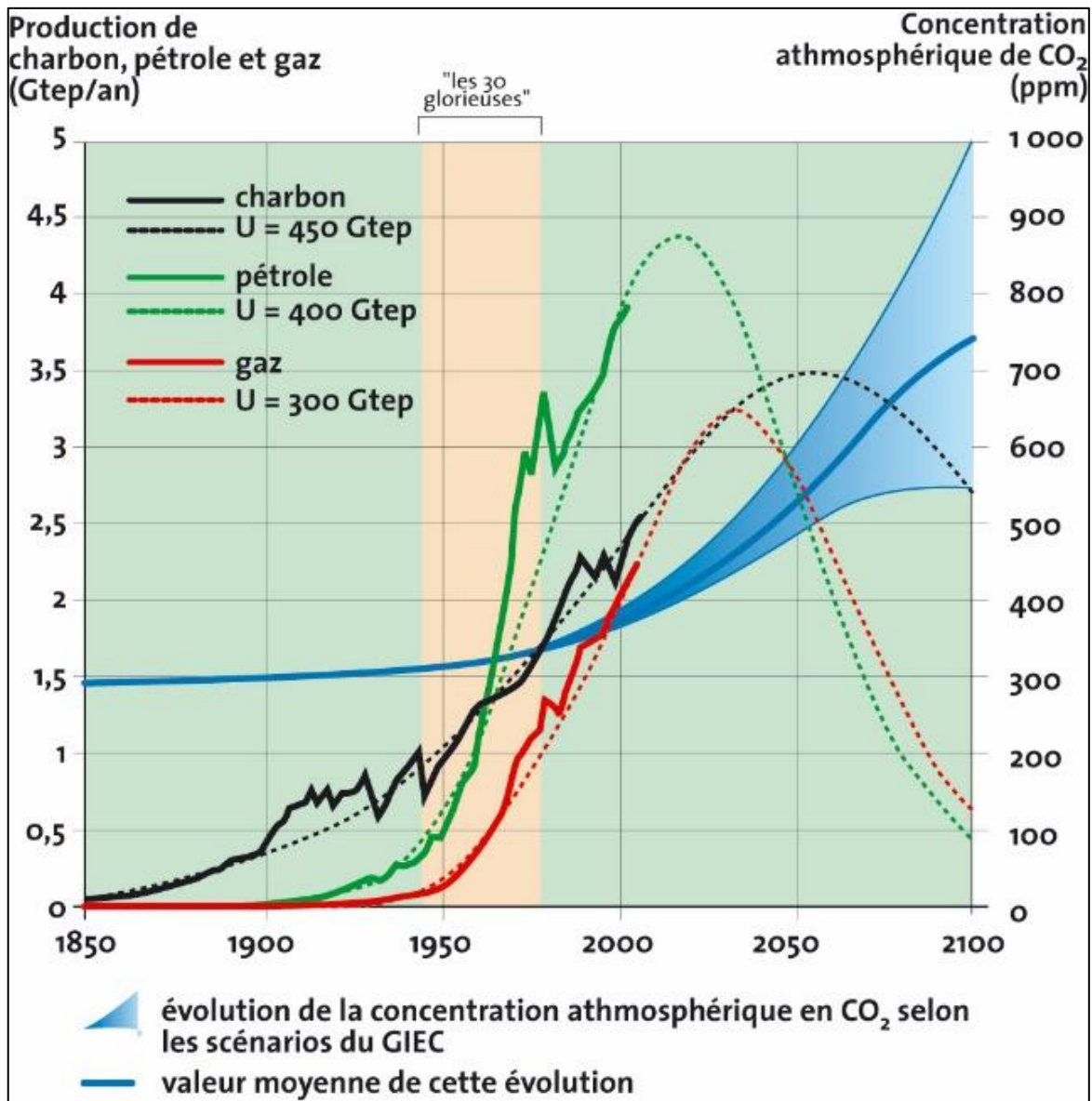
La France accueillera à Paris en décembre 2015 la 21<sup>e</sup> Conférence des Parties (COP21) à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et la 11<sup>e</sup> session de la réunion des Parties au Protocole de Kyoto. Chaque année, la Conférence se déroule par rotation dans un des pays des cinq groupes régionaux de l'Organisation des Nations unies : Asie-Pacifique, Europe de l'Est, Amérique latine-Caraïbes, Europe de l'Ouest élargie (WEOG) et Afrique. L'accueil du sommet de 2015 revenant à un pays d'Europe de l'Ouest, la candidature de la France a été retenue en novembre 2013. À l'image de l'enjeu planétaire des changements climatiques, les négociations internationales n'ont cessé de prendre de l'ampleur depuis Rio en 1992. Après l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto en 2005, une vision à plus long terme s'est imposée d'un objectif commun visant à contenir le réchauffement climatique à 2°C recommandé par le GIEC. Les pays, développés et en développement ont décidé de travailler à un dispositif ayant force de loi, applicable à toutes les Parties à la Convention Climat de l'ONU. Ce nouvel instrument devra être adopté à Paris en 2015 dans ses grandes lignes, avec comme objectif que tous les pays, dont les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre (GES) - pays développés comme pays en développement - soient engagés pour la première fois par un accord universel contraignant sur le climat dès 2020. La France souhaite un accord applicable à tous et doté d'une force juridique contraignante.

La seconde contrainte tient aux limites mêmes des ressources en énergies fossiles. Il s'agit en effet de substances issues de l'activité biologique (photosynthèse), enfouies au sein des couches profondes, mais en quantité limitées du fait des paramètres géologiques contraignant les gisements. Nous avons déjà passé le pic du pétrole bon marché, celui du gaz suivra de peu, et celui du charbon, s'il nous laisse plus de temps, est aussi la plus émetteur de GES. L'expansion économique de nos sociétés est largement dû à l'exploitation massive de ce stock qui nous a été donné par les dernières centaines de millions d'années de l'histoire terrestre et qu'un siècle à peine aura à moitié épuisé (Fig.1). À l'évidence, les besoins énergétiques futurs de l'humanité ne peuvent plus être assouvis par ces ressources, qui ont par ailleurs des usages beaucoup plus gratifiants (chimie organique, médicaments...) qu'il faut à tout prix se donner les moyens de conserver pour les générations futures au même titre que la biodiversité (bien que celle-ci n'étant pas fossile offre des possibilités de renouvellement).

La mutation est difficile tant nous sommes tous « drogués » d'énergie abondante et à bon marché, à laquelle la politique nucléaire française a contribué à nous accoutumer, au lieu de nous préparer au changement inéluctable qui doit reposer sur les énergies renouvelables, la maîtrise de l'énergie et la sobriété énergétique. Globalement au niveau planétaire, et ici même en France, le changement de paradigme qui s'impose est de prendre en compte le défi climatique et la bonne gestion des derniers stocks de fossiles, non comme un nécessaire « partage du fardeau », mais comme une opportunité de créations d'emplois et de richesses, d'invention de nouveaux modes de production et de consommation. Face à la nécessité de l'urgence à agir, la France dit accorder un soutien prioritaire aux politiques nationales pour faire du pays « une nation de l'excellence environnementale », en engageant, après la « Conférence Environnementale » de 2012 « une transition écologique ambitieuse et partagée » permettant une réduction des émissions de - 20 % en 2020 par rapport à 1990. Au sein de l'Union européenne, elle soutient une approche ambitieuse et exemplaire (objectif de -40% d'émissions de GES en 2030 puis de -60% en 2040 par rapport à 1990),

<sup>5</sup> Membre de l'Académie d'Orléans ; [jacques.varet@gmail.com](mailto:jacques.varet@gmail.com)

## Jacques Varet (suite)



*Fig. 1 : Nous sommes confrontés en même temps au pic des énergies fossiles et à l'impact des émissions qui résultent de ce déstockage massif sur le climat. La transition énergétique d'impose.*

Parmi les orientations fondamentales, il faudrait privilégier le recours aux ressources locales et les usages au niveau optimal. Ainsi près de la moitié des consommations énergétiques en Région Centre répond à des besoins de basse température (chauffage et eau chaude sanitaire) auxquels la géothermie peut parfaitement répondre en assurant le « facteur 4 » et mieux encore. Les PAC géothermiques sur ressources superficielles atteignent des COP de 60% et le chauffage direct a de meilleurs performances encore ! Au niveau national, c'est 40% des consommations d'énergie qui se font à basse température. Cet enjeu majeur reste encore très mal pris en compte par les politiques toujours trop centrées sur la production électrique ! Il en résulte que, malgré des ressources diversifiées et de qualité incontestables, et des technologies éprouvées, la France reste à la traîne dans ce domaine ! On est à peine à quelques % de pénétration de la géothermie dans le neuf, alors qu'en Suisse et en Suède, la géothermie avec PAC représente à elle seule 60 et 80% des installations de chauffage dans le neuf, alors que les ressources sont bien plus médiocres !

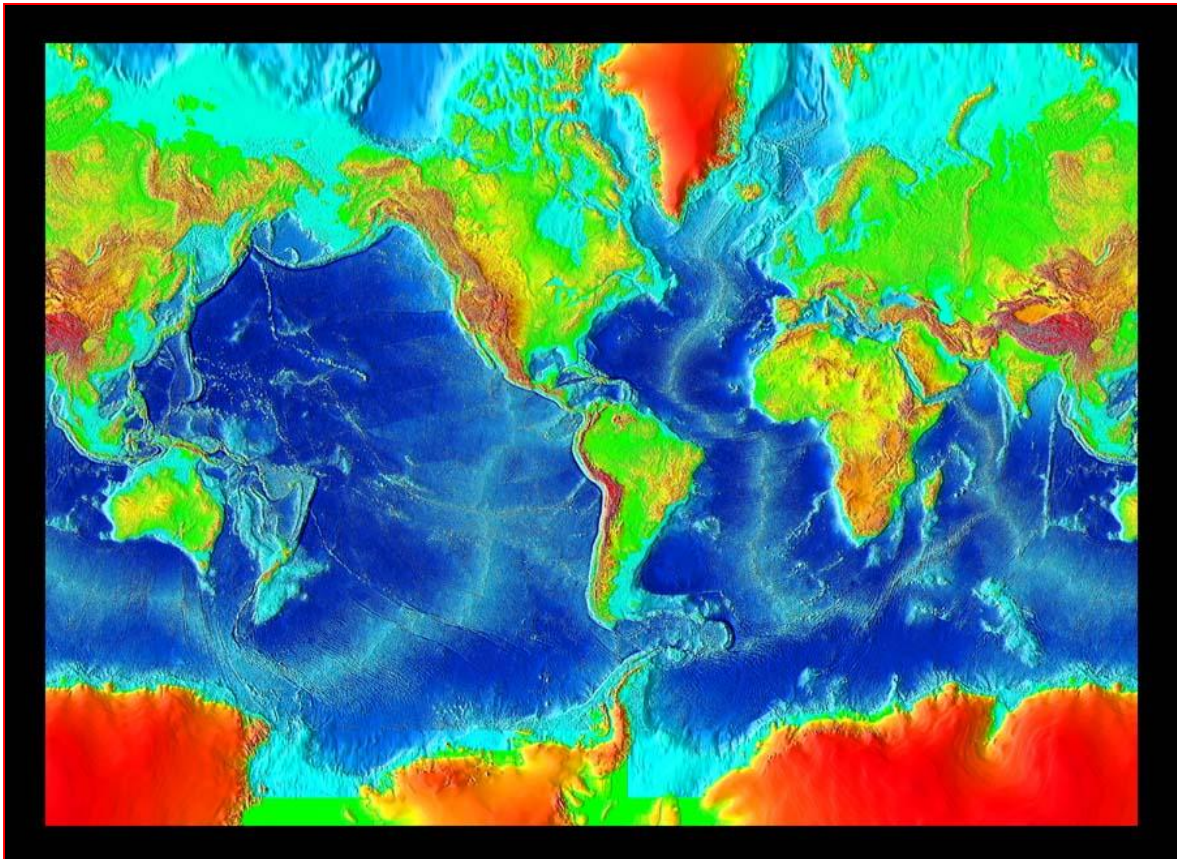


## Jacques Varet (suite)

De même, certaines régions du monde recèlent des ressources de haute température qui les placent en position de futurs pôles de développement industriel au niveau planétaire. On présentera l'exemple de l'Afrique de l'Est, où, par exemple, le Kenya s'est fixé l'objectif d'atteindre 5.000 MWe par géothermie en 2030 et 10.000 en 2050. L'Éthiopie, qui a misé jusqu'ici sur l'hydraulique, se tourne maintenant vers ces ressources dont elle dispose en plus grande abondance encore. Et le Japon pourra-t-il encore se contenter de jouer sa place de premier exportateur de centrales géothermiques, quand sa centaine de volcans actifs restent inexploités du fait d'un choix nucléaire ancien dont on connaît aujourd'hui les conséquences... La France dispose de ressources de cette nature aux Antilles, à La Réunion et sans doute aussi dans le massif central français, qui sont encore terriblement négligées.

Dans le concert mondial aussi, notre pays, avec ses partenaires européens, a bien une place à tenir dans ce domaine ! Au lieu de laisser l'Islande s'éloigner de l'UE, nous devrions la courtiser tant ses ressources et ses capacités scientifiques et techniques sont maintenant avancées. C'est bien un enjeu pour notre pays et notre région, qui ambitionnait un temps, avec Hubert Curien et Michel Sapin une position d'excellence en la matière !

La monoculture nucléaire n'est pas la solution. Le développement des énergies renouvelables dans le monde, de la géothermie en particulier, est un enjeu majeur. Comment en être absent ?



*Fig.2 : on dispose sur la planète terre de ressources énergétiques abondantes, non émissives et renouvelables aujourd'hui négligées : la géothermie*

# L'électro nucléaire en questions

Jean-Marie Lecocq<sup>6</sup>

C'est en 1896 que le français Henri Becquerel découvrit la radioactivité naturelle de l'uranium contenu en particulier dans les roches granitiques ; il mit en évidence un rayonnement (Gamma). Après lui, Pierre et Marie Curie découvraient le polonium et surtout le radium, plus d'un million de fois plus réactif que l'uranium (rayonnement bêta et alpha).

## Les débuts du nucléaire en France

Ce n'est qu'en 1934 qu'Irène Curie et Frédéric Joliot découvrirent la radioactivité « artificielle » en bombardant par des particules alpha de l'aluminium stable. En 1939, Joliot (et autres) cassèrent un noyau d'uranium en le bombardant avec un neutron provoquant un dégagement de chaleur et l'émission d'autres neutrons capables de provoquer à leur tour d'autres fissions ; c'est la réaction en chaîne, base de l'énergie nucléaire.

Le rôle primordial de ces chercheurs, récompensés par plusieurs prix Nobel, justifierait que la France soit qualifiée de « fille aînée du nucléaire »

La survenue de la seconde guerre mondiale empêcha Joliot de construire le premier réacteur nucléaire et ce sont des scientifiques européens expatriés aux USA dont l'italien Enrico Fermi, qui le construisirent à Chicago en 1942.

En France, le CEA créé par le général de Gaulle dès 1945 a étudié et construit plusieurs réacteurs de filières différentes à des fins militaires puis civiles avec le concours d'EDF. En parallèle, EDF s'intéressait à la filière eau légère développée aux USA (eau pressurisée et eau bouillante). En coopération avec les électriciens belges, il fut décidé de construire le réacteur PWR de SENA (240 MWe) à Chooz à la frontière franco-belge et un réacteur PWR de 900 MWe (Tihange 1) en Belgique. Puis EDF a poursuivi par les commandes des PWR de Fessenheim et Bugey avant de décider de développer massivement les réacteurs à eau légère pour faire face au choc pétrolier de 1973.

En 1975, le BWR a été définitivement écarté car présentant, outre des coûts et délais de construction 50 % supérieurs, des faiblesses en terme de sûreté aux yeux d'EDF et du CEA. Le choix définitif de la technologie PWR par la France se trouve d'ailleurs largement conforté par la comparaison des puissances électriques nucléaires aujourd'hui installées dans le monde ; la filière PWR (et VVER son équivalent russe) est largement majoritaire à 66 % contre 22 % pour la filière BWR.

## Comment s'est construit le parc nucléaire français ?

Dans les années 70, les constructeurs d'îlots nucléaires à eau légère étaient tous américains ou leurs licenciés. Après l'accident de la centrale de Three Miles Island (TMI) en 1979, un brusque coup de frein a été donné à la construction de centrales aux USA.

Dès les années 1990 les sociétés Siemens / KWU et Framatome / Areva ont fusionné leurs ingénieries nucléaires pour édicter des normes de sûreté communes, concevoir et construire des réacteurs répondant à ces normes. Par ailleurs des efforts de recherche importants ont été conduits dans le cadre de programmes communs mettant en œuvre les potentiels d'EDF, CEA, Areva et de leurs principaux partenaires.

Pour assurer sa mission de constructeur, de l'îlot nucléaire, Framatome, a construit dès le milieu des années 70 une usine à Chalon-sur-Saône dédiée à la fabrication des gros composants primaires et à Jeumont pour les pompes primaires, le tout dimensionné pour 8 réacteurs / an (France et export).

Plus généralement, de l'extraction du minerai d'uranium par Cogema, aux Autorités de Sûreté en passant par EDF, Alstom, Bouygues, Framatome, et tous leurs fournisseurs, c'est toute une filière nucléaire performante qui a été mise en place avec les financements correspondants aux ambitions du projet ; défi qui a été tenu puisqu'entre 1978 et 1989 près d'une cinquantaine de réacteurs ont été mis en service (sur 58 en service aujourd'hui), dont 6 en 1980, 8 en 1981, 5 en 1983, 6 en 1985. Dès 1995 75 % de la production électrique d'EDF était d'origine nucléaire.

---

<sup>6</sup> Diplômé de l'INSTN de Saclay ; jmlecocq@laposte.net

## Jean-Marie Lecocq (Suite)

### Quand arrêter définitivement les centrales ?

Europe Écologie Les Verts, Greenpeace, et autres associations écologiquement correctes réclament l'arrêt des réacteurs de Fessenheim au prétexte qu'ils sont les plus vieux de France.

En fait, il n'existe pas de « date de péremption » définie pour chaque centrale, mais à chaque arrêt de tranche annuel et de manière encore plus approfondie lors des arrêts décennaux, les équipements sont évalués ainsi que la sûreté de l'ensemble de la centrale. C'est la condition nécessaire pour obtenir l'autorisation de redémarrer de l'ASN.

Si l'ASN conditionne cette autorisation à la mise en œuvre d'améliorations, l'exploitant évalue le coût de ces améliorations et juge de l'intérêt économique de les mettre en œuvre ou décide d'arrêter définitivement la centrale.

Il ne faut donc pas arrêter les centrales au seul prétexte qu'elles sont « vieilles », mais les suivre avec attention pour mettre en évidence les effets du vieillissement : la sûreté des centrales est constamment améliorée par la prise en compte du retour d'expérience sur les parcs nucléaires français et étrangers.

### Quand et comment démanteler les centrales ?

L'arrêt définitif de la tranche marque le début de la période de déconstruction, toujours sous la responsabilité d'EDF maître d'ouvrage et dans un cadre réglementaire très strict. La déconstruction se déroule généralement sur une vingtaine d'années où l'on distingue 3 phases principales :

- *la mise à l'arrêt définitif* qui consiste à ôter au plus tôt le maximum de radioactivité
- *Le démantèlement partiel* qui concerne les équipements et les bâtiments conventionnels
- *Le démantèlement total* des équipements à l'intérieur du bâtiment réacteur et le bâtiment réacteur lui-même

Actuellement, 9 réacteurs définitivement mis à l'arrêt sont en cours de déconstruction. EDF a créé une unité d'ingénierie dédiée à la déconstruction et l'environnement, le Ciden et un centre de formation des intervenants dès 2001.

Le prix de KW/h facturé au client inclut la contribution au coût de la déconstruction des tranches nucléaires.

### Quel est l'avenir de la production nucléaire d'électricité ?

EDF est aujourd'hui le leader mondial de la production d'électricité nucléaire avec 80 % de sa production totale ; si l'on ajoute 9 % d'électricité fournie par l'hydraulique, c'est 90 % de l'énergie électrique produite sans émission de gaz à effet de serre.

La construction d'un parc de 58 tranches standardisées en « paliers » de 900 et 1300 a permis des coûts de fabrication réduits. La mise en place de toute une « filière nucléaire », de l'extraction du minerai d'uranium au retraitement des combustibles en passant par le maître d'ouvrage/exploitant EDF, les principaux constructeurs Framatome et Alstom, les autorités de sûreté pour ne citer qu'eux.

Le retour d'expérience permet de prévenir la survenue d'incidents sur l'ensemble du parc, d'améliorer les procédures de fonctionnement normales et accidentelles au chapitre de la maintenance la réduction des coûts et de la dosimétrie des intervenants. Ce parc nucléaire vieillit plutôt bien et verra sa sûreté accrue après la prise en compte du retour d'expérience de Fukushima comme l'a demandé l'ASN. L'entretien et la sûreté étant correctement assurés, il est possible d'envisager une prolongation de la vie de ces tranches.

Toutefois, il faut bien imaginer qu'il faudra un jour arrêter des tranches principalement pour des raisons économiques associées à un « acharnement » de remplacement d'équipements. L'EPR (European Pressurized Water Reactor) a reçu l'agrément des autorités de sûreté Ses performances de sûreté sont accrues par rapport aux réacteurs actuellement en exploitation. Ces améliorations représentent évidemment un coût de construction supplémentaire qui a été partiellement compensé. EDF a pris la décision en 2006 de construire un prototype (Flamanville 3) la tête de série de nouveaux paliers en remplacement progressif des réacteurs actuels,

A l'exportation, les succès passent par une organisation où EDF serait fer de lance, éventuellement avec des prises de participation aux cotés de l'exploitant local, associé à ses partenaires habituels et la mise en place d'Autorité de Sûreté locale avec le concours de notre Autorité de Sûreté Nucléaire.

## Jean-Marie Lecocq (Suite)

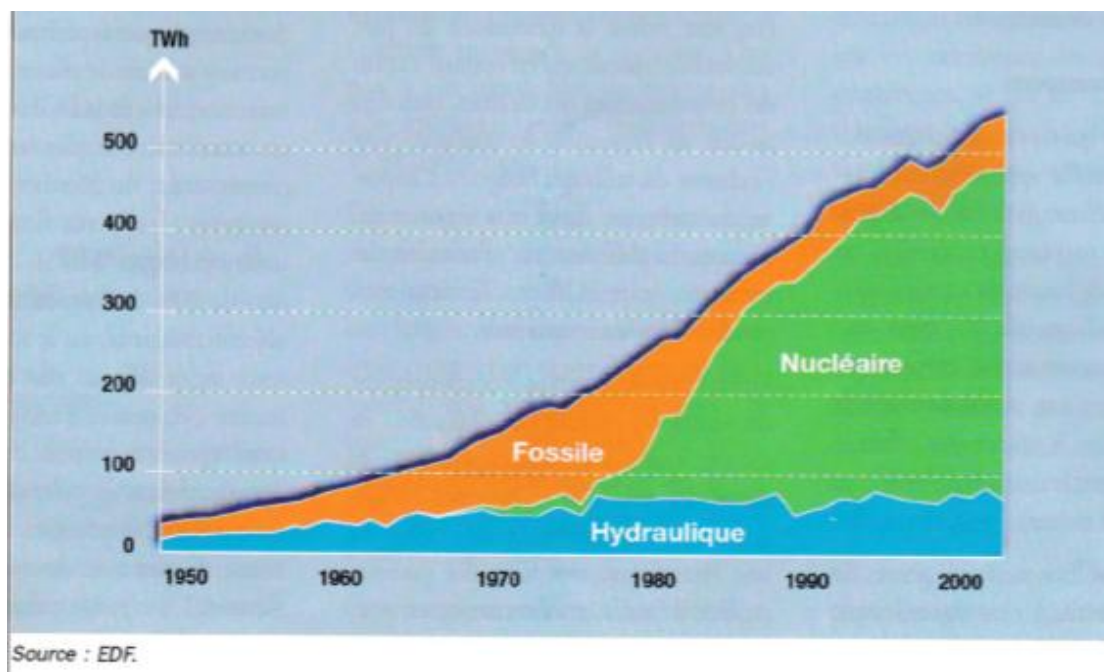
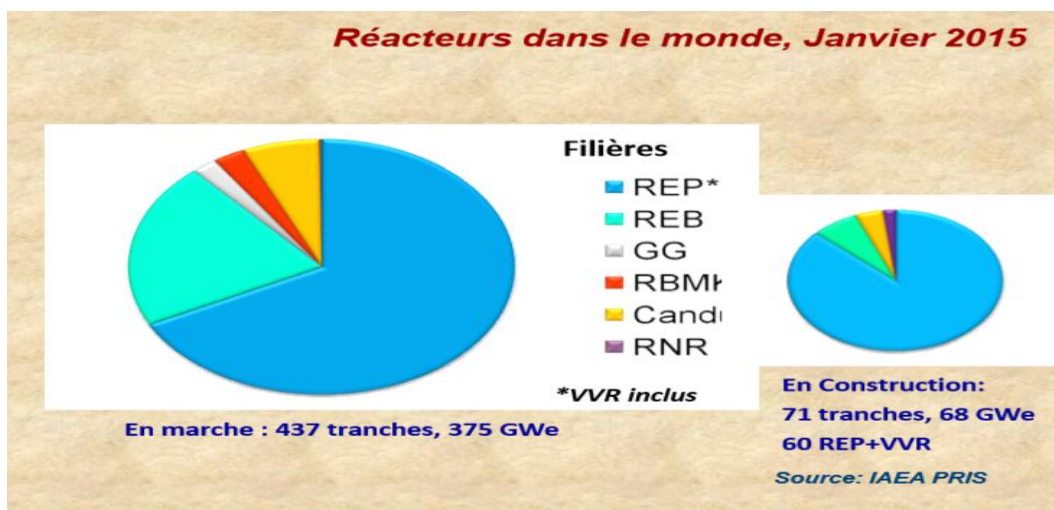
Notre industrie nucléaire est devenue une belle pépite que bien des pays nous envient. Mais la France doit assumer ce destin nucléaire, maintenir cet héritage actif et efficace pour le transmettre aux générations futures pour leur bien et celui de la planète; l'énergie nucléaire est appelée à jouer un grand rôle dans la lutte contre les gaz à effet de serre et les dérèglements climatiques associés.

### Dépendance vis à vis des ressources d'uranium

L'uranium est un élément largement répandu sur la croûte terrestre et des gisements de teneur et de capacités plus importantes ont permis à Cogema / Areva de diversifier ses sources d'approvisionnement. On peut facilement stocker ces matériaux fissiles dans un faible volume et pour plusieurs années, voire une décennie de production

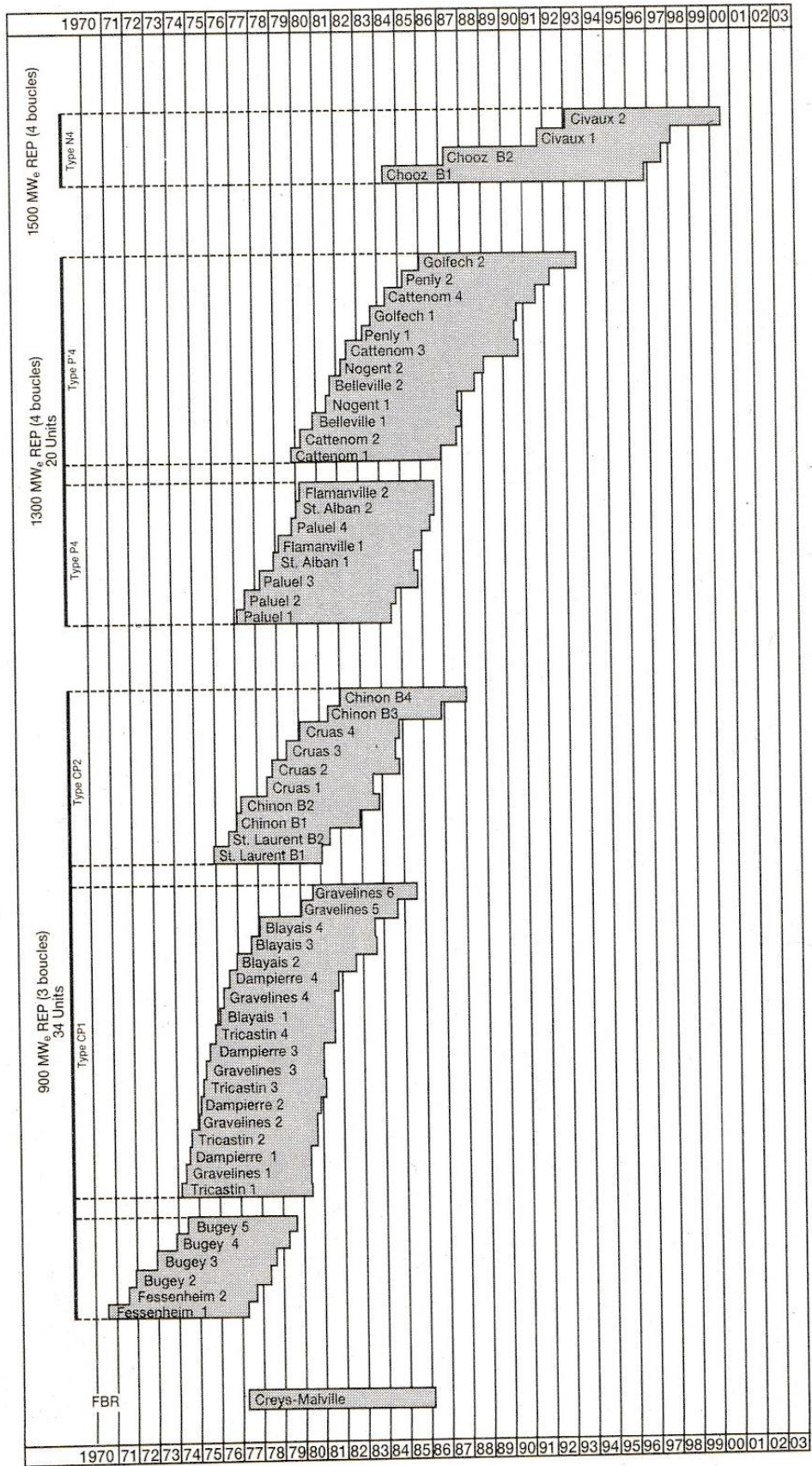
D'autre part, la filière des réacteurs à neutrons rapides ou surgénérateurs peut fournir de l'électricité tout en produisant plus de matériau fissile qu'elle n'en consomme. Enfin le Thorium, qui peut devenir fissile après bombardement neutronique, est un élément fertile encore plus répandu que l'uranium sur la croûte terrestre.

Il n'y a donc aucun risque de pénurie de matériaux fissiles pour alimenter les centrales nucléaires.



Production d'électricité en France

Jean-Marie Lecocq (Suite)



Le parc nucléaire français

## Energies, matériaux, chimie ... de la biomasse à la bio-économie<sup>7</sup> !

Claude Roy<sup>8</sup>

La bio-économie, c'est la transformation des produits de la photosynthèse végétale en aliments, matériaux, bases chimiques, fertilisants organiques et bio-énergies. Elle a fondé 5000 ans de civilisation humaine. Elle compte aujourd'hui pour plus de 5% dans notre économie industrielle et elle représentera notamment, d'ici 2020, la deuxième ressource énergétique mondiale derrière les énergies fossiles et devant le nucléaire. Car cette « énergie verte » aborde avec d'excellentes performances les marchés variés des carburants, du biogaz et du syngaz, de la chaleur et de l'électricité. Elle permet ainsi d'économiser annuellement près de 15 millions de tonnes équivalent pétrole d'hydrocarbures fossiles en France, soit plus de 10% de nos besoins totaux en pétrole, en gaz et en charbon.

Mais dans le « monde fini » qui s'annonce, nous percevons déjà plusieurs grands défis critiques à l'horizon du milieu du siècle : les ressources en eau, les ressources alimentaires et les ressources énergétiques suffiront-elles notamment à une population mondiale croissante et vieillissante de près de 10 milliards d'habitants? Les ressources énergétiques fossiles et fissiles dont nous disposons ne représentent ainsi, *grosso modo*, que cinquante années de notre consommation actuelle (*à l'exception du charbon dont les réserves excèdent deux siècles*)

A tout cela s'ajoute encore la menace planétaire du changement climatique face à laquelle nous ne disposons que de trois voies pour prévenir le danger et pour agir : La sobriété, l'économie du renouvelable et la séquestration du carbone. On s'aperçoit alors que la bio-économie et les valorisations de la biomasse « répondent » positivement, massivement et « sans regrets » dans chacune de ces trois voies obligatoires ! La bio-économie est en effet un modèle de sobriété d'abord, par la photosynthèse et par ses bio-produits dérivés ! Elle valorise aussi des bio-ressources renouvelables ! Elle développe enfin, par nature, des « puits de carbone » dans les champs et les forêts, dans les sols et dans les bio-produits. Cette bio-séquestration du CO<sub>2</sub> est un don unique de la nature certes, mais les plantes et les arbres ne poussent pas tous seuls, ou alors très mal ! La bio-économie, avec les hommes qui la pratiquent, est donc une véritable force de frappe et un amortisseur considérable contre le changement climatique. Pourtant, on en parle bien peu, même si l'économie du « carbone vert » nous apporte en outre beaucoup d'emplois.... Et souvent même, certains la critiquent au nom d'une soi-disant « écologie » conservatrice, voire sanctuariste, car il faut bien admettre qu'une bio-économie efficace signifie une agriculture et une sylviculture tout aussi efficaces, dynamiques et productives. Dix milliards de terriens obligent...

Sachons alors être véritablement durables, et responsables! Nous avons le devoir de mettre en valeur efficacement et « quantitativement » nos ressources, toutes nos bio-ressources, c'est à dire de stimuler notre agriculture et notre sylviculture. Cette bio-économie efficace et

<sup>7</sup> Texte publié dans « Les Echos » du 11 août 2014 sous le titre : Bio-économie : une stratégie gagnante !

<sup>8</sup> *Président du CLUB des Bio-économistes ; [claudio.roy01@agriculture.gouv.fr](mailto:claudio.roy01@agriculture.gouv.fr)*

## Claude Roy (suite)

soutenable devient alors, à ces conditions, l'un des meilleurs remparts contre le changement climatique, tout en nous fournissant par surcroît d'excellentes sources d'aliments, de matériaux, de molécules et d'énergies renouvelables, ...avec des emplois à la clé !

Bien entendu, ces filières de la biomasse sont beaucoup plus complexes et plus délicates à comprendre et à « gouverner » que l'éolien ou le solaire par exemple, car elles sont diversifiées et interdépendantes. Six types de bio-ressources sont valorisées d'un côté (*les bio-déchets, les sous produits cellulosiques, le bois, les cultures agricoles, les productions cellulosiques dédiées, la biomasse aquatique*), pour alimenter en aval neuf grands types de filières et de marchés (*l'alimentation, les fertilisants organiques, les matériaux, les néo-biomatériaux plastiques et composites, la chimie, les carburants, la chaleur, les gaz et l'électricité*). Tout cela, évidemment, se croise, se complète et se concurrence! Mais on peut toujours compter en revanche sur la variété quasi-infinie de toutes ces bio-ressources renouvelables, imposantes et disponibles dans la plupart des régions du Monde.

Il y a donc ainsi de multiples économies du « carbone vert », énergétiques et non énergétiques. Elles sont toutes en plein développement, partout dans le monde. Les filières bioénergétiques fournissent ainsi 19 % de l'énergie finale consommée au plan mondial. Et si l'on y regarde de près, selon l'Agence Internationale de l'Energie, les usages énergétiques mondiaux de la biomasse vont s'accroître très fortement d'ici 2035..., de +150% à + 300 % par exemple pour la bio-électricité ... , de +80% à +150 % pour la bio-chaleur industrielle et urbaine..., et de +250% à +700 % pour les biocarburants! C'est ainsi dans le domaine des biocarburants, malgré les polémiques douteuses et abusives qui les affectent, que l'attractivité de la biomasse sera mondialement la plus forte, pour les Etats comme pour les utilisateurs. Les biocarburants sont d'ailleurs, faut-il le rappeler, la seule alternative immédiate, opérationnelle et tangible, mais aussi partielle, aux carburants fossiles et à la carbochimie. Si l'on regarde alors les bouquets énergétiques planétaires, on découvre effectivement que la biomasse sera et restera la deuxième source d'énergie mondiale derrière les hydrocarbures fossiles, devant le nucléaire, assez largement devant l'hydraulique et très loin devant toutes les autres sources d'énergies solaires, éoliennes, hydroliennes et géothermiques réunies qui tiennent pourtant le haut de l'affiche! La place de la biomasse dans le domaine énergétique est donc très originale, car elle est à la fois importante et ubiquiste. Mais n'oublions pas à nouveau que la biomasse n'est pas « que », ni même « d'abord », une source d'énergie. Elle est fondamentalement le socle de l'alimentation, des matériaux et de la chimie avant de pouvoir devenir un carburant ou un combustible. Et la « valorisation matière » de la biomasse s'impose à nous prioritairement car elle procure un double bénéfice d'intérêt public: elle stocke d'abord du carbone (*à raison de une tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de biomasse*), et elle constitue ensuite, en fin de vie, un réservoir ultime d'énergie renouvelable récupérable (*à raison de 0,25 tonne équivalent pétrole par tonne de biomasse*).

Pour ce qui concerne la France, des « feuilles de route » énergétiques et climatiques ont été tracées, avec ambition, en mettant en jeu tout particulièrement les valorisations de la biomasse. La bio-économie, nous l'avons vu, contribue dans notre pays pour 5 % aux approvisionnements des industries nationales des matériaux, de la chimie et de l'énergie. Selon ces feuilles de route, il faudra doubler cette contribution d'ici 2025 (*Grenelle de l'environnement, paquet énergie climat*) et la quadrupler d'ici 2050 (*objectif du « Facteur 4 »*). Et ces objectifs devraient reposer pour les deux tiers sur le bois et les ressources forestières à mobiliser, contre 30%

## Claude Roy (suite)

provenant de l'agriculture et 10% des déchets organiques. Ceci explique qu'à côté de la filière bois et du secteur agro-alimentaire classiques, de nouvelles filières innovantes de la biomasse aient émergé en France depuis vingt ans. Elles sont jeunes, mais elles représentent déjà, dans notre pays, 1 500 entreprises environ, 14 milliards d'euros de chiffre d'affaires et 70 000 emplois, pour 2 ou 3 Mds d'euros d'investissements annuels. La France se place ainsi parmi les cinq grands pays « bio-économiques » au Monde, avec les USA, le Brésil, la Chine et l'Allemagne.

Bien entendu, comme pour le pétrole, il existe des limites à la bio-économie. Elles sont liées aux espaces disponibles et à la capacité que nous avons de tirer parti efficacement de la photosynthèse, dans les champs et dans les bois, en sauvegardant les sols et les ressources en eau. Elles s'imposent également pour nous rappeler, au plan mondial, les exigences de suffisance alimentaire d'une population croissante. Peut-on alors, face à de tels défis, s'autoriser le luxe, comme certains le revendiquent, de « mettre en réserve » massivement des forêts et des terres agricoles quand on sait que 10 milliards d'habitants auront besoin d'espace, de cellulose, de matériaux, d'énergie, de « carbone vert »... et surtout d'aliments ? Comment convaincre ceux qui semblent l'ignorer que le meilleur moyen de protéger les forêts, (*y compris et surtout même en zone tropicale*), c'est précisément de les gérer, de les exploiter et de les cultiver efficacement et durablement, notamment pour y intéresser les populations riveraines et conférer à ces forêts une utilité sociale et économique visible ? La nature sanctuarisée par l'homme n'est décidément pas durable... Cela veut donc dire que si l'on veut réussir ce pari du siècle, à 10 milliards d'habitants, il faut activement valoriser nos terres agricoles et nos forêts. Mais nous devons aussi maîtriser simultanément nos consommations de viande et de lait (*qui mobilisent à peu près six à sept fois plus d'espace agricole par ration alimentaire que des aliments à base végétale*). Et il faut bien entendu sauvegarder nos récoltes, dont on perd environ 30 % dans le monde au transport et au stockage. Il convient enfin de développer énormément l'aquaculture, comme source très efficace de production de protéines. En même temps, rappelons le encore, les itinéraires de production agricole et forestière devront être intensifs, mais aussi sobres et diversifiés. C'est là « LE » vrai défi qui est lancé à la recherche agronomique.

Alors, au point où nous sommes parvenus de ce « puzzle bio-économique », on conçoit qu'il est essentiel de pouvoir s'expliquer et de communiquer sans relâche sur toutes ces données complexes et si mal comprises dans nos sociétés urbanisées, devenues trop souvent « amnésiques et myopes » en la matière... Ne semblons-nous pas vouloir consommer sans limites, mais sans qu'il faille rien produire, ou presque, qui puisse nous déranger ou nous inquiéter?... Voilà bien l'un des paradoxes majeurs d'une civilisation, la nôtre, qui ne manque de rien, (*pour l'instant*), et qui a oublié la notion même de rareté ! Et voilà, s'il en était besoin, une bonne raison de privilégier l'information plutôt que les polémiques, de remettre l'écologie à sa bonne place et de redonner des bases populaires à la bio-économie.



## L'électricité : son transport et son stockage : hier, aujourd'hui et demain (la supraconductivité)

Gérard Besson<sup>9</sup>

Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, on sait transporter de grande quantité d'énergie sous forme de courant électrique, mais non sans d'importantes « *perte en ligne* ». On appelle cette dissipation sous forme de chaleur l'effet joule, il est du au déplacement des électrons dans la matière et surtout aux différents « chocs ». La loi d'Ohm simplifiée relie la tension et l'intensité du courant transporté.

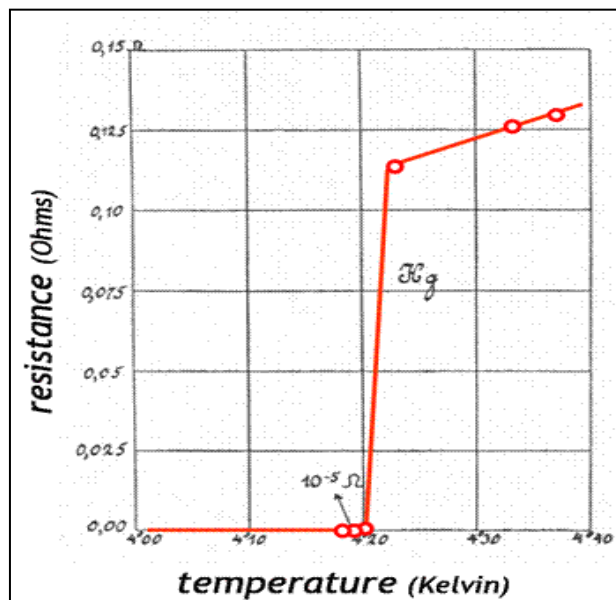
$$U = R \cdot I \text{ avec } R = \rho \cdot l / s$$

On peut imaginer facilement l'influence des divers paramètres pour diminuer les pertes. La résistivité  $\rho$  exprimée en  $\Omega\text{m}$  varie suivant les matériaux.

Matériaux	Cu	Al	Hg	C	verre	polystyrène
$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$17 \cdot 10^{-9}$	$22 \cdot 10^{-9}$	$941 \cdot 10^{-9}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{+17}$	$1 \cdot 10^{+20}$

### Historique.

En 1908 un physicien néerlandais Kamerlingh Onnes et son équipe ont réussi pour la première fois à liquéfier de l'hélium, ce qui leur permit de mener des mesures physiques jusqu'à des températures de 1.5 K. Il découvre que la résistivité du mercure devient nulle en dessous de 4.2 K appelée  $T_c$ , des expériences avec de nombreux autres éléments montrèrent que certains possédaient des facultés de supraconductivité. Les années passant de nombreux matériaux présentaient cette propriété.



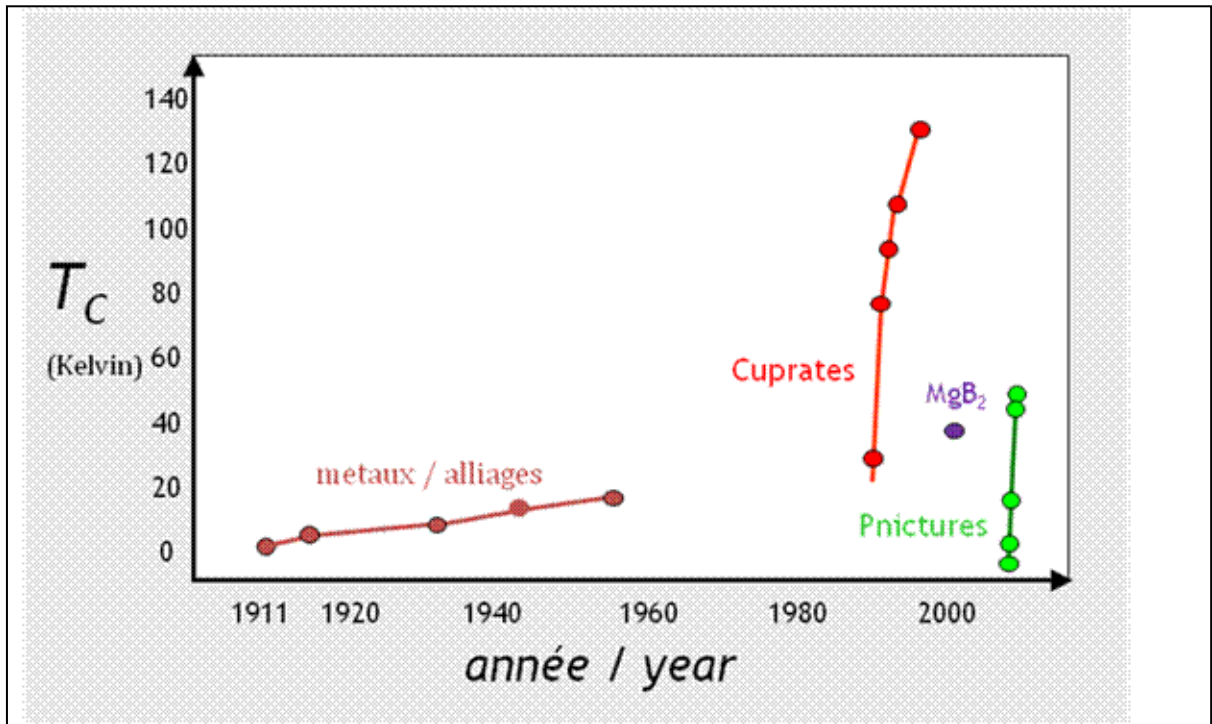
*Matériaux supraconducteurs.*

Matériaux	Hg	NbTi	Nb <sub>3</sub> Ge	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	YBaCuO	BiSrCaCu	TlCaBa.	Composite
$T_c$ K	4.15	9.5	23.3	85	92	110	121	164

La température de l'azote liquide 77.4°K est donc dépassée ce qui sur le plan des applications techniques est important car le litre d'hélium liquide coûte environ 5\$ alors que celui de l'azote est inférieur à 0.05 \$.

<sup>9</sup> Membre de l'Académie d'Orléans ; gbesson@neuf.fr

## Gérard Besson (Suite)

*Diamagnétisme parfait.*

Un matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique extérieur expulse celui-ci en dessous de la température critique, c'est l'effet Meissner. Cet effet montre que la supraconductivité ne se résume pas à l'existence d'une conductibilité infinie.

*Théorie.*

La théorie de Ginzburg-Landau développée en 1950 utilise l'équation de Schrödinger en introduisant un paramètre d'ordre.

La théorie BCS qui utilise le couplage des électrons en paires, appelées paires de Cooper, a été imaginée en 1957 par Bardeen, Cooper et Schrieffer avant la découverte des céramiques supraconductrices à haut  $T_c$ .

*Applications.*

Accélérateurs de particules comme le Large Hadron Collider qui a permis la découverte du Boson de Higgs. Il est constitué de 1 600 aimants supraconducteurs de 16 Teslas, répartis sur une circonférence de 27 kms.

Conservation de l'énergie dans un anneau supraconducteur dans lequel on injecte le courant.

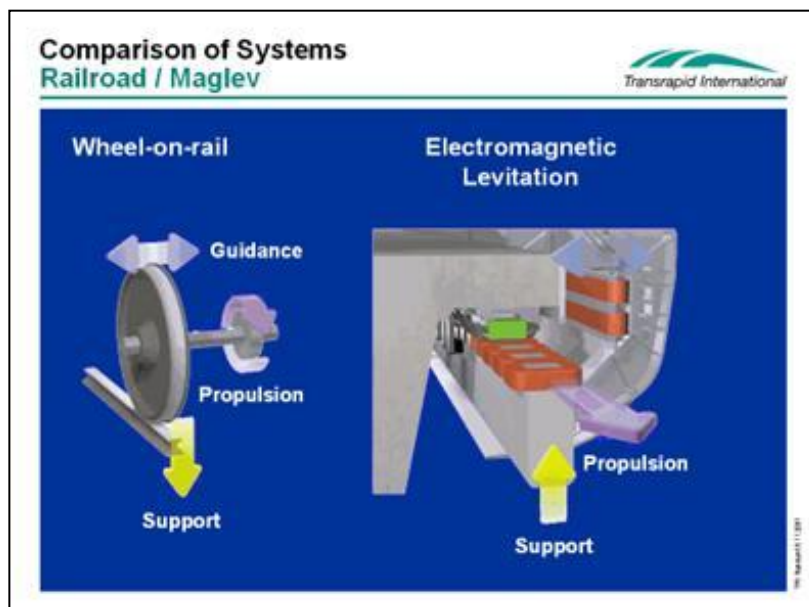
## Gérard Besson (Suite)

### Domaine médical



L'IRM ou imagerie médicale repose sur le principe que les atomes d'hydrogène du corps réémettent l'énergie accumulée par l'induction d'un fort champ magnétique obtenu grâce à un aimant supraconducteur. Elle remplace fréquemment la radiologie conventionnelle.

### Transport



Le moyen de transport terrestre le plus rapide actuellement est le train. Malheureusement ils possèdent une grande force de friction au niveau des roues. La lévitation magnétique supprime les contacts entre la voie et le train. Un record de vitesse est détenu par tel train avec 550 km/h soit 34,7 km/h de plus que le TGV.

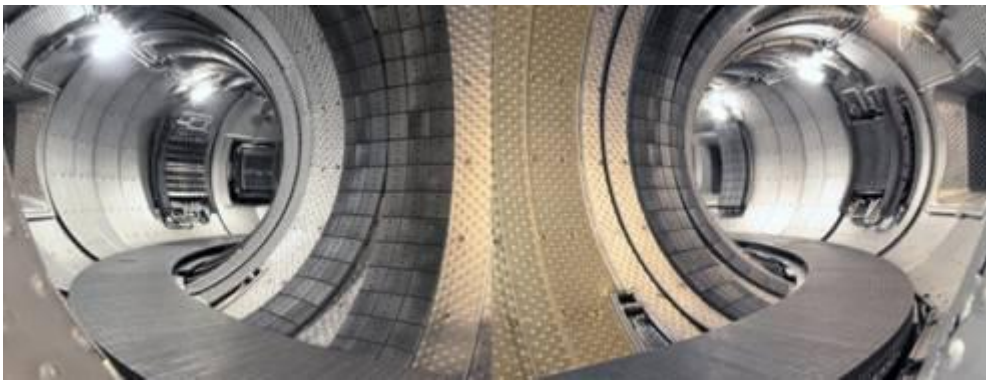
## Gérard Besson (Suite)

### Ordinateur



En associant certains composants électroniques et des supraconducteurs on obtient des ordinateurs 500 fois plus rapides qu'actuellement.

### Tokamak (confinement magnétique)



L'électricité produite par énergie nucléaire résulte de la fission de noyaux d'atomes, le « cassage » d'atomes, le rendement n'est pas excellent comparé à celui de la fusion de deux atomes. La réalisation de la fusion nécessite des températures de l'ordre de dizaines de millions de degré. Les atomes ne peuvent toucher aucune paroi et doivent être confinés dans un réacteur, le Tokamak grâce à des matériaux supraconducteurs permet de réaliser cette prouesse.

### Transport d'électricité



L'application des supraconducteurs dans le transport d'énergie est parfaitement justifié, du fait de leur résistivité nulle ils évitent les pertes de courant par effet Joule. Ainsi 8 400 kg de câbles de cuivre pourraient être remplacés par seulement 110 kg de câble supraconducteur, ce qui faciliterait également son enfouissement.

## Optimisation énergétique des véhicules

Michel Mudry<sup>10</sup>

Nous nous intéressons ici à ceux des véhicules - navires, automobiles, avions –qui sont complètement autonomes au sens où ils embarquent leur propre système propulsif. L'objet de cette intervention est d'évoquer la façon dont ce secteur s'est efforcé de limiter, à partir du premier choc pétrolier (1974), l'appel à cette ressource énergétique fossile qu'est le pétrole, sur laquelle il reposait totalement.

A l'époque, on s'est d'abord préoccupé de l'amélioration des rendements des moteurs, et on a envisagé le recours aux biocarburants. Ce fut, et c'est encore, un thème de recherche d'équipes de l'Université d'Orléans. Cette question pourrait à elle seule être l'objet d'une conférence. Nous consacrons donc cette intervention à une vision plus globale du véhicule, avec les deux sujets de :

- . la diminution de la résistance (ou : trainée) opposée par le fluide au mouvement du véhicule
- . la limitation d'emploi, voire le remplacement, des moteurs thermiques

Avant de le faire, il convient de rappeler que, dans ce domaine comme dans d'autres, les travaux d'optimisation ont été favorisés de façon décisive par la révolution micro-électronique qui s'est produite fort opportunément au cours des années soixante-dix. L'outil informatique a en effet fourni des puissances de calcul numérique ainsi qu'une rapidité d'exploitation des essais inconnues jusqu'alors, renouvelant de façon extraordinaire le dialogue théorie-expérience.

### Le combat contre la trainée

#### 1. Formes optimisées en automobile

C'est dans ce domaine que les marges de progrès étaient les plus fortes. Elles continuent d'être recherchées, la trainée étant de loin le premier facteur de consommation.

En raison de l'action (pression, frottements) que le fluide exerce sur les parois, tout objet animé d'un mouvement – disons : de translation rectiligne uniforme, de vitesse  $V$  –se voit opposé de la part du fluide une force résultante de même direction et de sens contraire et dont la valeur  $R_x$  peut être présentée sous la forme :

$$R_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide, et  $S$  l'aire qui caractérise le corps vu de face. L'information se trouve ainsi concentrée dans le coefficient de trainée  $C_x$ , lequel présente l'avantage de dépendre très peu de la vitesse, mais de la « forme » du corps. C'est en « travaillant » celle-ci que l'on a pu le faire chuter. C'est pourquoi les automobiles d'une même catégorie se ressemblent aujourd'hui furieusement : les lois de l'aérodynamique et la recherche fine de l'optimum (Figure 1) en sont la cause. Le  $C_x$  des véhicules de série des années cinquante était de l'ordre de 0,45, pour tomber à moins de 0,3 aujourd'hui. Des projets visent à le faire descendre demain au dessous de 0,2. Cela dit, il reste que la trainée varie comme le carré de la vitesse : celle-ci est principale responsable des surconsommations.

---

<sup>10</sup> Membre de l'Académie ; [michel.mudry@free.fr](mailto:michel.mudry@free.fr)

## Michel Mudry (Suite)



Figure 1 . Soufflerie automobile visualisation de l'écoulement

### 2 . *Winglets* aux extrémités des ailes d'avion

Le problème de réduction de traînée s'est posé différemment en aéronautique. En effet, l'aérodynamique de l'avion associe étroitement deux composantes d'effort: traînée et portance, cette dernière se substituant à la réaction du sol pour « vaincre » le poids du véhicule en mouvement horizontal. La portance se présente de façon analogue à la traînée :

$$R_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z$$

Les coefficients de portance  $C_z$  et de traînée  $C_x$  de l'avion augmentent avec l'incidence, angle que l'orientation de celui-ci forme la vitesse. Cependant le  $C_z$  atteint vite un maximum : c'est le décrochage. En dessous, il domine le  $C_x$ : on peut tirer cent fois plus de portance que l'on ne concède de traînée. C'est tout le secret du vol.

Pour l'avion, si le problème de la traînée de fuselage se pose comme en automobile, pour l'aile – élément qui fournit l'essentiel de la portance – la minimisation de traînée doit être recherchée pour une portance donnée, laquelle est en effet conditionnée par la masse de l'appareil. A soixante ans de



distance, le fameux chasseur britannique « Spitfire » considéré comme vainqueur de la bataille d'Angleterre, et ces étranges « *winglets* » (Figure 2) qui ont fait couramment leur apparition aux extrémités des ailes des avions de ligne d'aujourd'hui, résultent tous deux du traitement de ce problème d'optimisation.

Figure 2 . Boeing 767 équipé de winglets

## Michel Mudry (Suite)

### Des systèmes propulsifs innovants

#### 3 . Alcyone

Il s'agit là du nom du navire avec lequel Jacques-Yves Cousteau a démontré la pertinence d'un retour partiel à la marine à voiles, mais au moyen d'un dispositif innovant appelé turbo voile, dont la paternité revient à Lucien Malavard, un des grands noms de l'aérodynamique française. La turbo voile en question est en fait une aile épaisse, équipée d'un contrôle de décollement par aspiration, cylindre creux qui, monté sur le navire, a l'allure (Figure 3) d'une grande cheminée. Cette aile verticale fournit un  $C_z$  qui monte couramment à six fois – voir davantage – celui d'une voile classique, d'où une essentielle diminution de surface de voilure. Les recherches qui ont conduit à cela au début des années quatre-vingt ont eu lieu en partie à Orléans au sein de l'équipe aérodynamique. Elles furent soutenues par le Ministère de la Recherche et l'industriel de l'aluminium de l'époque, Pechiney. L'objectif était



d'équiper les pétroliers de plusieurs de ces turbo voiles, visant à tirer à tout instant le maximum de l'énergie éolienne et en complétant seulement avec le propulseur à hélice en cas de temps trop calme. Techniquement et économiquement le dispositif était valide. Les circonstances de l'époque n'ont cependant pas permis d'aller plus loin.

Figure 3. Alcyone et ses deux turbovoiles

#### 4 . e-Fan

Ce projet actuellement très avancé est celui de l'avion à propulsion entièrement électrique, solution qui paraissait pourtant hors de portée il y a peu, contrairement à ce que l'on connaît en automobile. Comme ce fut le cas pour le précédent, le projet bénéficie de l'implication d'un industriel –



Airbus – et du soutien des pouvoirs publics. C'est un petit avion d'une masse de 600 kg, d'allure assez classique (Figure 4), mais dont l'originalité est que les deux propulseurs sont entraînés par batterie.

Figure 4 . Le prototype e-fan

## Michel Mudry (Suite)

Evidemment le point crucial est l'autonomie, inférieure à une heure pour l'instant. Symboliquement, il est prévu une traversée de la Manche au mois de juin prochain. La cible commerciale de l'avion est donc pour l'instant l'école de pilotage, la voltige aérienne et le remorquage des planeurs, activités effectuées en local aéroport et pour lesquelles son silence ne sera pas le moindre de ses avantages.

### 5. Solar Impulse II

Cet avion improbable bénéficie actuellement d'une telle couverture médiatique que nous limitons notre propos à l'essentiel. A l'heure où ce texte est écrit, il a entamé son tour du monde, lequel doit le ramener à Dubaï au mois d'août prochain. Alors qu'Alcyone utilisait l'énergie éolienne pour un navire, Solar Impulse récupère l'énergie solaire au moyen de capteurs photovoltaïques couvrant l'extrados des ailes. Sa voilure très allongée (Figure 5) permet du même coup d'optimiser la finesse de l'appareil, c'est-à-dire minimiser la traînée pour une portance donnée. Cet avion n'est évidemment qu'un démonstrateur, dont l'avenir reste bien incertain.



Figure 5. Solar Impulse survolant Dubaï

En conclusion, cette description, forcément pointilliste, peut accessoirement permettre d'apprécier les voies complexes et hasardeuses de l'innovation. Au-delà d'informations factuelles, on tente aussi d'expliquer le pourquoi des choses, principalement en aérodynamique. Cette discipline à peine plus que centenaire, à la fois science de base et – puisque née avec l'avion – science pour l'ingénieur, est bien sûr essentielle à l'énergétique. Il faut dire enfin qu'aucune des avancées décrites n'aurait été possible sans les progrès de la science des matériaux et de la mécanique des structures. Cette remarque montre combien les innovations résultent bien souvent de l'assemblage de progrès dans des domaines disjoints, combien elles sont conditionnées par l'exercice de la pluridisciplinarité.



## *Transition énergétique : de nouveaux modèles de croissance?*

**Jean-Marie Chevalier<sup>11</sup>**

L'expression de « transition énergétique » s'est glissée dans le vocabulaire énergétique au moment de l'accident de Fukushima et, depuis cette date, elle a pris une importance croissante. En France, le débat sur la transition a été lancé en septembre 2012 et il a abouti en 2015 à la loi sur « la transition énergétique pour la croissance verte ». En Allemagne, en Italie, en Grande-Bretagne, et dans de nombreux autres pays on évoque le même concept de transition qui recouvre en fait une transformation progressive des systèmes énergétiques historiques vers des systèmes plus efficaces, plus intelligents, moins centralisés et moins intenses en carbone. Cette définition inscrit la transition énergétique dans une évolution historique globale fondée sur les progrès technologiques et organisationnels, la prise de conscience du réchauffement climatique, la volonté croissante des populations de participer aux choix énergétiques et sociétaux. Une telle approche dépasse les frontières de l'énergie car elle impulse une nouvelle conception de l'activité économique.

### **1. Une remise en cause de l'organisation énergétique traditionnelle**

La dynamique institutionnelle et juridique européenne remet en cause les structures énergétiques traditionnelles puisque la concurrence doit être introduite partout où cela est possible. Les filières verticalement intégrées et monopolistiques sont brisées : pour le gaz et l'électricité, une séparation est opérée entre les activités qui relèvent de la concurrence (production, services, fournitures) et celles qui relèvent du monopole (le transport par fils et tuyaux) soumises au contrôle d'une autorité de régulation, la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).

Par ailleurs, les gouvernements européens se sont engagés dans la voie du développement durable par ce que l'on appelle le paquet énergie-climat, une décision européenne de 2009, qui impose la règle des « trois vingt pour 2020 » : améliorer de 20 pour cent l'efficacité énergétique, monter la part des énergies renouvelables à 20 pour cent du bilan énergétique et réduire de 20 pour cent nos émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau atteint en 1990. En 2015, l'objectif de réduction des émissions a été porté à 40 pour cent à l'horizon 2030.

La transition énergétique est donc d'abord caractérisée par ces trois priorités stratégiques qui incarnent une sorte de « vision européenne de l'énergie ». Elle se caractérise en outre par un profond mouvement de décentralisation des décisions et par l'apparition de nouveaux acteurs. En France, le débat qui a accompagné la préparation de la loi sur la transition (2012-2014) a donné lieu à des centaines de débats locaux au moment où les régions préparaient leurs plans locaux énergie-climat. Il est clair qu'une immense mobilisation populaire s'est effectuée sur ces thèmes. Elle correspond à une volonté des citoyens d'agir directement sur leur environnement quotidien : qualité de l'air qu'ils respirent, de l'eau qu'ils boivent, du bruit qu'ils peuvent supporter, commodité des transports, confort et propreté de leur environnement proche. Ces implications locales incluent nécessairement la volonté d'utiliser les ressources énergétiques locales et souvent de les combiner, ce qui n'était pas la préoccupation majeure des acteurs traditionnels. Des systèmes énergétiques locaux émergent ainsi. Ils ne vont pas se substituer aux systèmes anciens mais s'y associer dans une forme d'hybridation.

---

<sup>11</sup> Professeur émérite à l'Université Paris-Dauphine ; [jean-marie.chevalier@dauphine.fr](mailto:jean-marie.chevalier@dauphine.fr)

## Jean-Marie Chevalier (suite)

### 2. Croissance verte et économie circulaire

Deux thèmes reviennent de façon récurrente dans la transition énergétique : croissance verte et économie circulaire. La croissance verte recouvre l'émergence de formes de croissance moins intenses en carbone, plus décentralisées, plus responsabilisées par rapport à l'environnement. L'économie circulaire elle, tendrait à remplacer l'économie linéaire (produire, consommer, jeter), par une économie plus sobre dans la conception des produits, leur circulation et leur recyclage. Les déchets d'une filière deviennent des inputs pour d'autres filières. Le titre IV de la loi française sur la transition énergétique pour la croissance verte inscrit l'économie circulaire dans la dynamique d'évolution : réduction des quantités de déchets mis en décharge, amélioration de la conception des produits quant à leur impact sur l'environnement, application du principe de proximité pour la gestion des déchets et le recyclage, mise en place de tarifications incitatives. Ces orientations conviennent aux collectivités locales qui peuvent trouver des projets sur lesquels se mobilisent les communes, les administrations, les élus, les associations, les entreprises, les citoyens. En septembre 2014, le Ministère de l'Ecologie du Développement durable et de l'Energie a lancé un appel d'offre pour des projets de territoires à énergie positive pour la croissance verte. Les réponses ont été au-delà des espérances : 528 collectivités et groupements de collectivités, répartis sur l'ensemble des régions ont répondu à l'appel. Des aides et subventions devraient être attribuées aux meilleurs projets

La transition énergétique est en marche. La rapidité de la transformation dépend fondamentalement de la prise de conscience citoyenne du réchauffement climatique. Les consommateurs expriment de nouvelles formes de demande qui devraient pousser leurs gouvernances à l'action. On peut décrypter dans ce mouvement des changements structurels importants qui modifient l'organisation historique des chaînes de valeur et de leur mode de gouvernance. De nouvelles opportunités d'affaires et de nouveaux métiers sont ouverts. Ces changements sont accompagnées la plupart du temps par un recours systématique aux nouvelles technologies de l'information et de la communication qui entraînent une sorte de digitalisation des flux énergétiques, flux physiques et flux financiers.

Les innovations sont technologiques mais aussi organisationnelle, financières, juridiques, institutionnelles. Les principaux acteurs de ce mouvement, entreprises et collectivités locales, devraient acquérir de très solides avantages comparatifs pour la transformation non seulement des systèmes énergétiques, mais, plus largement des systèmes économiques. Le climat est ainsi un défi, non seulement pour les systèmes énergétiques mais, plus largement pour les systèmes économiques.





5, rue Antoine Petit  
45000 Orléans  
[lacado@wanadoo.fr](mailto:lacado@wanadoo.fr)  
[www.lacado.fr](http://www.lacado.fr)