



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

**Chaire Développement durable - Environnement, Energie et  
Société**

**Pr Jean Marie Tarascon, titulaire 2010-2011**

---

**SYNTHESE GLOBALE**

*Colloque du 6 et 7 juin 2011*

*“L’énergie : enjeux socio-économiques  
et défis technologiques”*

---

La chaire reçoit le soutien de TOTAL.

Les comptes rendus du colloque ont été élaborés avec le concours de Junior Consulting-  
Sciences-Po.

Collège de France 11 place Marcelin Berthelot 75005 Paris

Contact : Marie Chéron : 33(0)1 44 27 11 78

- Tous droits réservés -



**COLLÈGE  
DE FRANCE**  
—1530—

## **SOMMAIRE**

<b>I - LA PERIODE ACTUELLE : UN HERITAGE A TRANSFORMER.....</b>	<b>3</b>
<b>II - FACE A L'URGENCE, DES DEFIS TECHNOLOGIQUES MAJEURS.....</b>	<b>5</b>
<b>III - CONCLUSIONS &amp; PERSPECTIVES.....</b>	<b>9</b>



Nous consommons plus d'énergie que nous n'en avons à disposition et l'impact de cette consommation contribue à la dégradation de l'environnement. Notre mode de gestion de l'énergie repose donc sur une série de contradictions, entre l'épuisement des énergies fossiles traditionnelles, le défi technologique permettant de les remplacer et les ambitions des pays émergents désireux d'asseoir leur croissance économique sur le modèle existant. Aujourd'hui, le monde vit environ 40% au-dessus de ses moyens, les énergies fossiles représentant entre 80 et 90% du bouquet énergétique global.

Un changement de paradigme est donc nécessaire à court terme, afin d'adopter de nouveaux modes de consommation viables à long terme. Ce défi mondial doit être engagé dans les cinquante prochaines années et devra concerner les secteurs technologique, économique et politique pour apporter une réponse cohérente.

## I - LA PERIODE ACTUELLE : UN HERITAGE A TRANSFORMER

La situation que nous connaissons aujourd'hui repose sur un long processus industriel aux conséquences naturelles considérables. A l'origine, la biomasse représentait la source d'énergie privilégiée des êtres humains. Dans ce cycle énergétique, le CO<sub>2</sub> rejeté était réabsorbé. Ce cycle « naturel » du carbone a été modifié au moment de la révolution industrielle, celle-ci constituant un tournant majeur et dérégulant fondamentalement le processus de réabsorption. A titre d'exemple la teneur de CO<sub>2</sub> qui était de 250ppm en 1950, et qui est aujourd'hui de 370ppm sera de 500ppm en 2050 si on continue dans la lancée « Business as usual ».

Nos comportements n'ont guère changé depuis le XVIIème siècle, le progrès technique et les découvertes ayant entraîné une augmentation de la consommation d'énergies fossiles. Cette période a provoqué des évolutions cruciales, faisant de la biomasse une source d'énergie fossile et de l'être humain un agent géologique majeur; le système énergétique du XXIème siècle reposant encore principalement sur des découvertes datant du XIXème. Ce modèle, considéré aujourd'hui comme obsolète, ou sur le point de le devenir, est aux fondements du développement industriel et technique de nos sociétés.

Cependant, il se caractérise par des pertes colossales, notamment dans l'acheminement de ladite énergie. A titre d'exemple pour 2 joules d'énergie lumineuse fournis par une lampe à incandescence nous avons besoin de 100 joules d'énergie primaire, 98 joules étant consommés lors des approvisionnements en énergie primaire, la conversion thermique-électrique, et la distribution. De façon assez générale, on peut dire que pour 1 joule d'énergie économisé, 4 à 5 joules d'énergie primaire seront à produire en moins.

Aux Etats-Unis, environ 50% de l'énergie primaire est perdue, gâchée durant la production, conversion ou la transmission.

Les deux grandes questions sont donc celle de la « durabilité » et celle de l'efficacité des nouveaux modes de production de l'énergie. On estime que la demande en énergie va doubler d'ici à 2050, puisqu'on passera de 14 TW à 28 TW de puissance installée d'ici 2050; or, ces prévisions sont intenable d'un point de vue des ressources disponibles et de l'impact de leur utilisation sur l'environnement. Le défi consiste donc à lier le progrès technique à la protection de l'environnement. Ces développements récents, sont en croissance et se sont rapidement étendus aux pays émergents, notamment la Chine, désireuse de diversifier son mix énergétique.

Cependant, les initiatives restent isolées. La protection de l'environnement et l'amélioration de nos procédés de production énergétiques sont un défi global auquel il convient de répondre de façon globale. Les dimensions politiques et socio-économiques doivent également être placées au

cœur du cheminement. Le premier obstacle concerne bien sûr la question du développement. Comme nous l'avons déjà souligné, les sociétés occidentales se sont développées grâce à l'utilisation des énergies fossiles. Par ailleurs, environ 2/3 des émissions passées sont le fruit des pays développés. La dimension historique est donc centrale. Les pays émergents ont de fait toute légitimité à vouloir suivre ce chemin afin d'alimenter des besoins sans cesse grandissants et une croissance économique forte.

En revanche, si des pays tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil n'entament pas le virage énergétique, les efforts entrepris seront vains, et les conséquences sur l'environnement irréversibles. Un pacte mondial est par conséquent primordial afin de réguler la consommation d'énergies fossiles et de tendre vers des modes de consommation durables.

Le virage économique sera au cœur des dynamiques de ces prochaines années, extrêmement compliquées à gérer. En effet, on estime que dans vingt ans, les avancées technologiques offriront un « arsenal » de possibilités dans la production et gestion de l'énergie à développer.

En revanche, le lien entre énergies propres et modèles économiques permettant la croissance reste à trouver. La tendance de ces dernières années s'est principalement axée sur une stratégie de « découplage » consistant à continuer à produire plus mais en utilisant moins de ressources.

Or, ces comportements ne fonctionnent qu'à une échelle réduite et surtout ils n'entraînent pas de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>. Le modèle économique durable devra donc être basé sur les technologies durables, et vice versa. Pour arriver à cela, il faut privilégier la visibilité en termes d'investissements. En effet, les difficultés de prévision découragent les investisseurs privés, faisant de l'Etat l'acteur incontournable de ces politiques. Pourtant, dans une période de crise marquée, l'impact de ces investissements sur la dette publique constitue un obstacle majeur et entraîne un recul de l'Etat qui n'est pas comblé par des investisseurs. Le poids du lien entre finances publiques et économie verte reste trop important. Pour le réduire, nous devons nous efforcer de proposer une structure financière stable. Celle-ci passe par l'établissement d'une relation solide entre recherche scientifique et raisonnement économique qui permettrait d'intégrer des technologies adaptées au marché.

## II - FACE A L'URGENCE, DES DEFIS TECHNOLOGIQUES MAJEURS

La marche vers une énergie mondiale décarbonnée implique des défis technologiques considérables. Si des avancées certaines ont été accomplies notamment en matière d'énergies renouvelables, l'état actuel de nos connaissances et du marché de l'énergie ne permet pas encore d'envisager une transition claire et suffisamment rapide vers une énergie propre. La question du coût reste centrale : malgré des investissements publics croissants, les nouvelles technologies vertes doivent à tout prix être compétitives vis à vis des énergies fossiles pour pouvoir espérer les remplacer un jour. L'utilisation de ressources abondantes, peu chères et renouvelables constitue le défi principal de l'innovation en matière d'énergie afin de ne pas s'enliser à nouveau dans des situations de dépendance non durables.

Pour diverses raisons, les sources d'énergie renouvelables ou peu polluantes présentent aujourd'hui des lacunes qui les empêchent de se développer à une large échelle. Malgré les nombreux avantages de l'énergie solaire, par exemple (sécurité, égalité dans l'accès, abondance...), son coût de conversion en électricité par la technologie photovoltaïque reste encore trop élevé même s'il est l'un des seuls à décroître de façon régulière.

Comme pour l'éolien, le problème du stockage d'une source intermittente d'énergie l'empêche d'être totalement neutre en CO<sub>2</sub>. Enfin, des efforts restent à faire sur l'analyse de cycle de vie du produit en termes de longévité du matériel, de toxicité et d'utilisation de métaux rares non renouvelables dans leur fabrication.

Une fois ces défis adressés, il s'agira d'entamer l'immense chantier d'adaptation des réseaux énergétiques urbains à ces nouvelles sources. La solution au problème de l'intermittence des énergies renouvelables pourrait passer par le développement de réseaux intelligents, les *smart grids*, qui modélisent l'information sur la demande et déterminent les mix énergétiques les plus efficaces sur le court terme. Une autre solution serait la possibilité de stocker l'électricité et d'assurer l'existence d'interconnexions avec les marchés voisins.



Concernant les avancées en matière de biocarburants, on rencontre les mêmes défis liés au prix, à l'analyse du cycle de vie et à leur neutralité effective en émission de gaz à effet de serre. Il est donc pratiquement certain que sans innovation majeure, la demande pour le pétrole et le gaz continuera à croître dans les 20 prochaines années.

Pendant longtemps, le nucléaire fut considéré comme un « mal nécessaire », assurant une énergie décarbonée et peu chère en contrepartie de déchets non traitables. Face aux craintes suscitées par l'accident de Fukushima, cette idée s'est érodée comme en témoigne le choix récent de certains pays de sortir de cette trajectoire énergétique. Avec un recul d'une quarantaine d'années, il est encore difficile de prédire la sécurité du parc nucléaire sur le long terme à cause des effets méconnus de l'irradiation sur les matériaux des centrales. Les événements récents ont aussi démontré nos limites à connaître l'impact des mouvements géologiques ou catastrophes naturelles sur nos centrales, ainsi que les dangers liés à la privatisation de leurs services de sécurité.

La question des déchets est également loin d'être résolue, même si la génération IV de réacteurs promet une efficacité accrue dans le recyclage de certains éléments comme le plutonium. Il y a donc urgence aujourd'hui pour améliorer l'existant ou inventer des sources nouvelles d'énergie, plus sûres ou plus efficaces.

Ce bilan en demi-teinte ne doit pas nous faire oublier que l'innovation naît de la contrainte. Le défi global amène des équipes du monde entier à chercher des solutions technologiques très complexes afin d'endiguer rapidement les problèmes qui nous attendent si nous continuons le « *buisness as usual* » en matière d'énergie.

Les solutions présentées plus loin ne sont pas toutes à un stade assez avancé pour être opérationnelles ; elles constituent néanmoins une esquisse possible de notre futur énergétique.

Afin d'adresser la question du stockage, des batteries nouvelles sont en train d'être développées avec notamment des batteries redox-flow et des batteries liquides plus efficaces en termes de coût que la batterie Lithium-ion par exemple. Il s'agirait d'une « batterie colossale » pour un stockage non mobile de masse. L'existence d'une telle batterie bon marché pourrait être le facteur de réussite des énergies renouvelables intermittentes. En revanche, la batterie Lithium-ion reste la mieux adaptée pour la voiture électrique car chaque application possède un ratio puissance-énergie différent. Malgré son prix (environ 500-600 € /kWh) , elle reste la plus sûre, mobile, et résiste aux chocs. D'un point de vue écologique, par contre, il convient de regarder d'où vient l'énergie électrique servant à alimenter ces véhicules. En effet, si cette électricité provient de centrales à charbon, le bilan CO<sub>2</sub> n'est pas amélioré. A titre d'information environ 400kWh d'énergie est utilisé pour assembler 1kWh de batterie.

Dans le futur, nous aurons aussi besoin de convertisseurs d'énergie à hauts rendements, ce qui a déclenché une recherche importante depuis fort longtemps sur les piles à combustible. Comme une batterie, une pile à combustible transforme directement et de façon continue de l'énergie chimique en énergie électrique, mais le potentiel d'énergie n'est pas stocké dans la pile. Si des verrous techniques subsistent à sa mise sur le marché (tels que sa faible durée de vie), la pile à combustible pourrait durablement changer le paysage énergétique.



Le constat que, chaque jour, l'énergie solaire qui frappe la Terre couvrirait 10 fois les besoins annuels humains motive les chercheurs à inventer des moyens de mieux capter cette énergie. Une idée serait de la transformer en carburant liquide facile à utiliser et à stocker. La difficulté évidente est de convertir l'énergie en une forme chimique utilisable comme le méthanol. Pour aller plus loin, des travaux sont menés sur des moyens de reproduire la photosynthèse en créant une feuille artificielle. Pour l'instant, ce domaine de recherche butte sur la question des catalyseurs mais bénéficie également d'investissements colossaux ; on notera la création d'un HUB photosynthèse artificielle aux USA qui sera financé à la hauteur de 25 millions de dollars par an pendant 10 ans. Face au défi du catalyseur, le rêve des chimistes est de créer une cellule photo-électrochimique sans métaux nobles. Ce qui meut cette recherche est la démarche bio-inspirée, c'est à dire la tentative d'imiter le vivant dans ce qu'il sait faire de mieux.

« Imiter la nature » est une idée qui inspire d'autres types d'innovation énergétique. Les méthodes de capture-séquestration du carbone en imitant le cycle terrestre sont une autre piste mais qui se révèle insatisfaisante pour le moment.

La solution de conversion du CO<sub>2</sub> en carbonates solides, par exemple, est satisfaisante du point de vue de la sûreté mais empiriquement ce processus est extrêmement lent. Pour obtenir des résultats efficaces, il faudrait accélérer cette réaction d'un facteur 10. Pour d'autres raisons, l'injection du CO<sub>2</sub> dans des roches volcaniques basiques ou ultrabasiques reste également problématique. On peut citer également le concept de « bioraffinerie » fonctionnant comme un « écosystème industriel » en utilisant de la biomasse comme entrant qui sera transformée et intégralement recyclée. Les utilisations possibles dépassent le cadre des biocarburants liquides ; il s'agirait de produire des biomolécules (qui deviendront décisives avec la fin de la pétrochimie), des textiles, des ingrédients...

Cet exemple fait appel à la notion de recyclage, ou pour aller plus loin de la réincarnation des matériaux. En effet, nous sommes en présence de « mines urbaines » qui pourront être exploitées un jour grâce à l'imagination des ingénieurs. Les piles, les accumulateurs et les batteries sont un concentré d'énergie dans une masse réduite. Cependant, pour adresser ces matériaux, il faudra une technologie bon marché permettant de les traiter car très souvent, ce qui coûte le plus cher à traiter est ce qui est le moins important. Enfin, la chimie verte apparaît comme cruciale pour limiter l'impact de nos modèles de production grâce à de nouveaux procédés chimiques.

Il semblerait pourtant que le plus important - avant même la technologie – reste le capital humain qui passe par de nouvelles normes et de nouveaux comportements.

### III - CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Au vu de la complexité de la planète, il semble peu probable que nous traitions le problème du changement climatique à court terme. En revanche, ce colloque aura servi à démontrer que le problème de l'énergie peut être affronté : ces deux jours ont vu s'accorder des compétences variées ce qui prouve qu'aucune discipline n'a la totalité de la réponse et qu'il va falloir travailler ensemble. Les solutions semblent se distribuer sur trois tableaux : l'amélioration de l'efficacité énergétique, le développement massif des énergies renouvelables et l'encadrement des émissions de carbone par la régulation. Nous pouvons également espérer que la nouvelle génération, plus sensibilisée aux enjeux environnementaux, changera de perspective et commencera à considérer l'énergie pour sa fonction et non plus comme une marchandise.

La question des modes de vie reste pourtant épineuse : doit-on concentrer nos efforts uniquement sur l'efficacité énergétique ou devons-nous développer la sobriété? Avons-nous la légitimité pour encourager les pays émergents à sortir des énergies fossiles ? Ce qui est certain, c'est que la solution ne relèvera pas du « tout nucléaire » ou « tout solaire » mais certainement d'un mix intelligent, et se réalisera de façon progressive.