

Nouvelles technologies :

clé de notre avenir
ou cause de
notre perte ?

Robert Chapuis
Alain Deshayes

Préface de Michel Debout

Nouvelles technologies :

clé de notre avenir
ou cause de notre perte ?

AVERTISSEMENT

La mission de la Fondation Jean-Jaurès est de faire vivre le débat public et de concourir ainsi à la rénovation de la pensée socialiste. Elle publie donc les analyses et les propositions dont l'intérêt du thème, l'originalité de la problématique ou la qualité de l'argumentation contribuent à atteindre cet objectif, sans pour autant nécessairement reprendre à son compte chacune d'entre elles.

Robert Chapuis

Alain Deshayes

Préface de Michel Debout

SOMMAIRE

Préface	7
Michel Debout	

1^{ÈRE} PARTIE :

Les technologies émergentes et leur impact
sur la société

Alain Deshayes

Introduction	11
---------------------------	----

Biologie de synthèse et nanotechnologies : des technologies émergentes	16
La biologie de synthèse fait de la biologie une science de l'ingénieur	16
Les nanotechnologies : création et contrôle d'objets nanométriques	21

Biologie de synthèse et nanotechnologies : des technologies en rupture	26
Rupture technologique et nouveaux champs d'application	27
De nouvelles révolutions industrielles ?	32
Des questions éthiques et sécuritaires	34

Les responsables politiques face aux enjeux des nouvelles technologies	39
Des lois cadres dans tous les domaines scientifiques et technologiques	43
Redonner confiance à l'opinion publique	47
Réaffirmer le rôle des pouvoirs publics dans les processus de décision	52
Conclusion	57

2^{EME} PARTIE :

La politique de l'énergie face aux nouvelles technologies

Robert Chapuis

Introduction	65
Les leçons de la prospective et de la recherche	67
Les scénarios du futur	69
L'avenir de l'électricité	72
Les nouvelles énergies	76
Encourageante biomasse	79
Enthousiasmante hydrogène	81

Les données à prendre en compte	83
Le poids du passé	84
La sécurité des approvisionnements	85
L'état de la recherche	87
Les choix politiques pour l'avenir	89
Pour un développement durable	89
Pour un « mix » énergétique	94
Une politique industrielle volontariste	98
Un contrôle démocratique	100
Conclusion	102
<i>Remerciements</i>	107

PRÉFACE

Michel Debout

Chacun peut faire le test suivant : depuis trente ans, qu'est-ce qui a le plus modifié son mode de vie ? La chute du Mur de Berlin ou l'usage de l'ordinateur, des courriels ou du téléphone portable ?

Avec la place grandissante des techno-sciences dans le quotidien, le rapport au monde et aux autres s'est radicalement transformé. Le risque est de réduire les questions posées à celles, essentielles certes, des cultures d'organismes génétiquement modifiés (OGM), du dérèglement climatique ou de l'avenir de l'énergie nucléaire. La tragédie de Fukushima est venue interroger la fiabilité des centrales et, dans un autre domaine, le scandale du

Michel Debout est président du Comité économique, social et culturel du Parti socialiste.

Mediator a mis à jour la question du rôle et de la place des experts dans les décisions sanitaires, de leur contrôle démocratique (par l'Etat lui-même) et des conflits d'intérêts.

Qui parle aujourd'hui, dans le débat public, de l'HGM (homme génétiquement modifié) ? Quelle place vont prendre demain – après les écrans de nos ordinateurs – dans nos postes de travail ou à domicile les robots, sans parler de leur forme désormais possible de robot humanoïde ? Quelle place revient aux peuples et à leurs représentants dans les choix essentiels qui vont cependant structurer leur avenir ?

Nous savons que ce sont les choix d'investissements réalisés par la finance privée, s'appuyant sur des chercheurs parfois aux ordres, qui permettront l'émergence de nouveaux savoir-faire sans aucun contrôle des citoyens eux-mêmes. Nous savons que, lorsqu'une nouvelle technique est devenue disponible, il est trop tard pour en limiter l'usage, et ne demeure que le débat éthique qui survient alors à contretemps.

Loin de la colère des peuples qui s'exprime dans cette période de crise économique et sociale, loin même de la fureur des armes qui résonne aux portes de l'Europe, c'est sur l'évolution des sciences et des techniques et de leur contrôle nécessaire que se joue l'avenir de notre monde. Les échanges organisés sur ce thème par le Comité économique, social et culturel du Parti socialiste et la Fondation Jean-Jaurès – dont cet Essai fait la synthèse – viennent ainsi à point nommé.

PREMIERE PARTIE

Les technologies émergentes et leur impact sur la société

Alain Deshayes

INTRODUCTION

Depuis le début de l'ère industrielle, l'histoire n'a cessé de montrer combien les technologies structurent les sociétés, beaucoup plus que ne l'appréhendent les responsables politiques. D'une manière générale, ces derniers anticipent rarement les conséquences éthiques, sociales et économiques des technologies émergentes, et lorsque leur développement donne lieu à une polémique, ils sont impuissants à y répondre de façon appropriée.

Alain Deshayes est ingénieur agronome et ancien directeur de recherche à l'INRA où il a fait l'essentiel de sa carrière. Adjoint au directeur scientifique des productions végétales de 1986 à 1993, il fut, en particulier, en charge des biotechnologies végétales. Après une année passée à la Direction des stratégies industrielles au ministère de l'Industrie, il a rejoint la R&D d'un grand groupe de l'agroalimentaire. Depuis 2003 il est membre du bureau du Comité économique, social et culturel (CESC) du Parti socialiste.

Trois facteurs essentiels expliquent leur manque de réactivité. D'abord, ils connaissent mal les nouvelles technologies. Quelles sont-elles ? Faut-il encourager leur développement ? Ils ne savent pas. C'est compréhensible dans la mesure où l'urgence du quotidien et les échéances à court terme constituent des priorités dans leur action, mais cela a souvent une conséquence fâcheuse : dans l'analyse des situations sociales et économiques, ils ne prennent pas en compte, ou pas assez, la dimension « effet technologique ». Par exemple, il est clair pour tout le monde que la crise financière, économique et sociale actuelle résulte directement de la politique libérale de financiarisation de l'économie et de la mondialisation du marché spéculatif des capitaux impulsée par Ronald Reagan à partir de 1980. En revanche, le fait que la crise est amplifiée par la modélisation mathématique et par les progrès des technologies de la communication n'intervient pas dans les débats, ni, donc, dans les décisions de régulation du système bancaire. En effet, l'automatisation des ordres de mouvements de capitaux peut désormais être exécutée en un millième de seconde en réponse à une

information elle-même numérisée, ce qui ne peut qu'augmenter les risques de déstabilisation des marchés, et, par contre-coup, de l'économie réelle elle-même.

Par ailleurs, il apparaît que les responsables politiques ne perçoivent pas clairement l'échelle de temps nécessaire pour que les technologies aient un impact économique : en sont-elles au stade de l'idée, du démonstrateur ou en phase préindustrielle ? Cela n'aide pas à anticiper les retombées positives ou négatives que pourrait avoir telle ou telle technologie sur le développement de la société si celle-ci était mise en œuvre. Cette « myopie » peut générer des surcoûts importants selon que la décision politique est prise de ne pas développer une technologie alors qu'il aurait fallu le faire, ou, à l'inverse, d'en développer une alors qu'elle est en passe de devenir obsolète. Le Plan calcul¹ illustre bien ce qu'ont coûté à la France les erreurs de choix, ou de non-choix, technologiques et industriels.

1. Lancé en 1966 sous l'impulsion du Général De Gaulle, le Plan calcul devait permettre à la France d'assurer son indépendance en matière de gros ordinateurs. Ce fut un échec et le président de la République nouvellement élu Valéry Giscard d'Estaing abandonna le plan en 1975.

Enfin, la conjonction des deux premiers facteurs expliqués plus haut – méconnaissance de l'état des technologies, d'une part, et absence de la perception de l'échelle du temps nécessaire à l'émergence de leur impact économique, d'autre part – conduit les responsables politiques à gérer dans l'improvisation les réactions négatives de l'opinion face à une technologie donnée. Or aujourd'hui, les citoyens veulent non seulement donner leur avis sur le développement des technologies mises en œuvre, mais aussi intervenir dans les processus de décision. Les responsables politiques, qui sont amenés à prendre les décisions finales, devraient pouvoir tenir compte simultanément de ces trois facteurs, technologiques, économiques et sociétaux. On observe facilement à quel point c'est difficile. Il en ressort une anxiété et une défiance croissante des citoyens à l'égard des scientifiques et des ingénieurs.

En nous appuyant sur l'exemple de deux ensembles de technologies émergentes, la biologie de synthèse et les nanotechnologies, notre objectif est ici de montrer la

nécessité pour les responsables politiques de prendre en compte, le plus en amont possible, les conséquences sociales, économiques et éventuellement éthiques du développement de nouvelles technologies, et des nouveaux produits qu'elles engendrent.

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE ET NANOTECHNOLOGIES : DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

La biologie de synthèse fait de la biologie une science de l'ingénieur

La connaissance des phénomènes biologiques a fait des progrès considérables au cours des dernières décennies. On pourrait presque dire que les scientifiques sont passés, en une cinquantaine d'années, du stade de l'observation du vivant à celui de l'intervention sur le vivant. Or aujourd'hui, les « technologies du vivant » sont devenues des faits de société, avec tous les débats qu'elles peuvent entraîner.

Tout le monde garde à l'esprit les polémiques nées, à partir de 1996, après la mise sur le marché de variétés végétales génétiquement modifiées. L'opinion a affirmé son opposition avec tant de verve que recherches publiques et privées ont quitté la France, et plus généralement l'Union européenne, pour des pays qui acceptaient mieux l'utilisation de ces technologies. Le moins que l'on

puisse dire, c'est que scientifiques, industriels et politiques n'ont pas su gérer le triptyque technologie, échelle de temps et pression sociétale. Malgré cette situation, les biologistes ont franchi une nouvelle étape dans leur capacité à agir sur le vivant. Avec la biologie de synthèse, il ne s'agit plus seulement d'introduire dans le génome d'un organisme un ou deux gènes isolés du même organisme ou de tout autre organisme. Il s'agit en effet de créer des organismes ayant des fonctions qui n'existent pas dans la nature, voire de créer de nouveaux organismes.²

Un concept et une démarche

Selon les spécialistes, la biologie de synthèse ne s'identifie *sensu stricto* à aucune technologie nouvelle, pas plus qu'elle ne se réfère à une application donnée. Elle se définit comme un nouveau concept en même temps qu'elle correspond à une nouvelle démarche. Conceptuellement,

2. Cf. Geneviève Fioraso, « Les enjeux de la biologie de synthèse », Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques, 15 février 2012 : www.senat.fr/rap/r11-378-1/r11-378-1.html ; « The Royal Academy of Engineering, Synthetic Biology: scope, applications and implications », mai 2009 : www.raeng.org.uk/synbio

elle vise à modifier et/ou concevoir de manière rationnelle des systèmes complexes basés sur le vivant, ou inspirés par le vivant, mais dotés de fonctions qui n'existent pas dans la nature. Pour cela, elle cherche à coupler les connaissances acquises dans les sciences biologiques, physiques, chimiques et mathématiques avec les avancées technologiques dans les domaines de l'informatique, des biotechnologies et des nanotechnologies. Ainsi, la biologie de synthèse a fait de la biologie une science de l'ingénieur. Certains préconisent d'ailleurs d'employer le concept d'« ingénierie de la biologie » plutôt que celui de biologie de synthèse. On n'est plus dans la description des systèmes mais bien dans des démarches rationnelles de construction ou de déconstruction de systèmes biologiques.

L'approche constructiviste utilise la capacité à caractériser, voire à modifier, les éléments constitutifs élémentaires du vivant (protéines, ADN, ARN), les « bio-briques » qui permettent l'élaboration des chaînes métaboliques, lesquelles s'agrègent pour constituer des organismes. A l'inverse, l'approche déconstructiviste a pour objet de

s'abstraire de la complexité du vivant en déterminant la structure minimale d'un système qui permette sa réplication et la réalisation d'une tâche donnée de la manière la plus efficace possible.

La biologie de synthèse va donc bien au-delà de la biotechnologie telle qu'on la concevait jusqu'à présent : il ne s'agit plus seulement de l'ingénierie d'un gène, mais de l'ingénierie des génomes, avec comme perspective l'optimisation de voies métaboliques mais aussi l'optimisation d'organismes. Toutefois, il faut avoir conscience que cette approche, qui s'apparente à une forme de « lego moléculaire », reste encore une chimère. Notre maîtrise des « bio-briques », comme des voies métaboliques, est toujours insuffisante, et dépasser leur complexité exigera du temps.

De la modélisation à la conception de nouveaux systèmes biologiques

La biologie de synthèse se justifie par ses applications, mais elle offre également des méthodologies qui permettent une

meilleure compréhension des systèmes biologiques, laquelle conduit ensuite, dans une démarche de nature itérative faite d'allers et retours entre la paillasse et l'ordinateur, à imaginer, modéliser, construire et améliorer de nouveaux systèmes.

Ainsi, la compréhension des rythmes circadiens, c'est-à-dire la capacité pour un organisme de percevoir l'alternance jour/nuit, n'est pas venue des généticiens mais des modélisateurs qui ont montré comment les produits d'un ensemble de quelques gènes contribuaient à la réalisation d'un système qui s'apparente à un oscillateur. En retour, la conception d'un modèle mathématique a permis d'imaginer, de simuler et de construire un système biologique qui, implanté chez un malade, peut fonctionner comme une horloge biologique et délivrer, à heure fixe, la bonne dose d'un médicament.

Les nanotechnologies : création et contrôle d'objets nanométriques

« Elles ouvrent un monde où les frontières traditionnelles entre la physique, la chimie, la biologie et l'ingénierie s'estompent, voire disparaissent, où l'inerte et le vivant se rejoignent, où les lois de la physique quantique deviennent, en quelque sorte, perceptibles immédiatement ». C'est par cette formule saisissante qu'Alain Obadia, dans son rapport de 2008 au Conseil économique social et environnemental³, décrivait les nanotechnologies et exprimait les progrès fantastiques de la physique. Afin de clarifier l'usage et la réglementation des nanomatériaux, l'Union européenne en a donné, en 2011, la définition suivante : c'est « un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé, contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par

3. Alain Obadia, « Les nanotechnologies », Conseil économique social et environnemental (CESE), juin 2008 : www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2008/2008_21_alain_obadia.pdf

taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm ».

Observer et décrire la matière à l'échelle nanométrique

C'est le microscope à « effet tunnel », inventé en 1981, qui, associé à des logiciels de modélisation et de calcul, a ouvert la voie au nanomonde en rendant possible l'observation de la matière à l'échelle atomique et, sous certaines conditions, son déplacement atome par atome. Tous les outils développés par les physiciens ont permis de comprendre la structure et l'agencement des particules élémentaires, les nanoparticules, mais aussi d'en comprendre le mouvement.

Ces connaissances produites par les nanosciences ont amené à constater que des nanoparticules sont formées dans des conditions naturelles particulières (organes de certains organismes ou poussières volcaniques), mais aussi au cours de certaines activités humaines (teintures de cheveux contenant des cristaux de sulfure de plomb, ou objets

contenant un minerai de fer très chargé en carbone et qui ont été soumis à un traitement thermique au cours de leur fabrication). Mais quand on parle d'une particule de dimension nanométrique, de quoi s'agit-il exactement ? Le « nanomètre » correspond à un milliardième de mètre, ou encore à un millionième de millimètre. Exemple concret : un cheveu humain a une épaisseur d'environ 80 000 nanomètres !

Les progrès des connaissances dans les domaines des nanosciences ont logiquement conduit les scientifiques à imaginer des procédés permettant de fabriquer des nanoparticules, ou nanomatériaux, et c'est là le domaine des « nanotechnologies ».⁴

Construire des objets de taille nanométrique

Les ingénieurs cherchent depuis toujours à miniaturiser la taille des objets entrant dans la fabrication de certains

4. Alain Obadia, *ibid.* ; cf. aussi Centre national de Documentation pédagogique, développement et régulation des nanotechnologies, Dossier de présentation/Débat public, septembre 2009.

produits, comme les composants électroniques. Cette approche, dite « descendante », a certes permis une augmentation significative de la vitesse de fonctionnement et de la capacité de stockage des ordinateurs et des puces, mais plus on s'approchait des dimensions nanométriques, plus les technologies de miniaturisation atteignaient leurs limites.

Les avancées scientifiques et technologiques, au cours des années 1980-2000, ont permis l'émergence de procédés de fabrication d'objets nanométriques par assemblage d'atomes, c'est la démarche dite « ascendante ». Depuis une dizaine d'années, ces procédés se sont considérablement diversifiés et perfectionnés, ouvrant la voie à des applications en constante augmentation. Comme pour la biologie de synthèse, la modélisation constitue une démarche complémentaire de l'approche expérimentale pour obtenir une meilleure connaissance des conditions d'assemblage des atomes et donc pour optimiser de manière itérative la construction de nanoparticules. Celles-ci sont ensuite assemblées pour constituer le produit final

qui est souvent de taille macroscopique, comme les puces électroniques ou les capteurs d'images. A terme, il sera sans doute possible de construire des nanosystèmes qui résulteront de l'assemblage de plusieurs composants d'échelle nanométrique. On voit donc, comme pour la biologie de synthèse, que nous ne sommes qu'à l'aube d'une période d'innovations encore insoupçonnées.

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE ET NANOTECHNOLOGIES : DES TECHNOLOGIES EN RUPTURE

La biologie de synthèse et les nanotechnologies recouvrent des concepts et des démarches technologiques différents, mais aussi de nombreux points de convergence. Ces deux ensembles traduisent des sauts technologiques dans des domaines variés qui permettent de faire des avancées conceptuelles, lesquelles, à leur tour, lèvent des verrous et suscitent de nouvelles applications qui vont engendrer de nouveaux développements industriels. Ainsi, ils ont profité des progrès considérables des technologies de l'informatique : modélisation, imagerie, capacité de traitement et de stockage de données. Dans les deux cas, les synergies entre différents domaines technologiques amplifient les potentialités de chacun. Ainsi, c'est la confrontation des approches de la biologie de synthèse avec les propriétés de certains nanomatériaux qui a conduit à créer des systèmes plus performants pour délivrer un médicament.

Rupture technologique et nouveaux champs d'application

L'exemple de la chimie illustre bien le type de rupture technologique et d'ouverture de nouveaux champs d'application qui caractérise la biologie de synthèse. La chimie de synthèse avait constitué une rupture avec la chimie analytique : non seulement il devenait possible de produire des molécules de manière plus efficace que ne savait le faire la nature, mais aussi de créer des molécules qui n'existent pas à l'état naturel. De manière équivalente, la biologie de synthèse constitue une rupture avec la biologie d'observation, car, si elle vise bien à améliorer ce que la nature sait faire, elle cherche aussi à créer de nouveaux systèmes biologiques. Systèmes dont, par ailleurs, il est difficile de prévoir le comportement.

Des analogies avec le domaine des nanotechnologies paraissent évidentes. C'est en effet l'émergence de technologies de traitement individuel des atomes qui a permis de passer de la physique des particules aux « nanosciences »,

puis aux « nanotechnologies ». Cette maîtrise de la matière au niveau de l'atome a ouvert la voie à la fabrication de nouveaux matériaux, les « nanomatériaux ». Ceux-ci n'ont, le plus souvent, pas d'existence naturelle et leurs propriétés sont *a priori* non définies et se révèlent différentes des structures « macro » équivalentes. Par exemple, le carbone, qui est friable dans une mine de crayon, est plus résistant que l'acier lorsqu'il est sous forme de nanotubes. Ou encore l'or qui devient rouge sous forme « nano ». Mais il y a une analogie encore plus frappante : à partir des « bio-briques » qui constituent les systèmes vivants, comme à partir des « atomes » qui constituent les molécules, il devient envisageable de construire des systèmes entièrement nouveaux pour des applications qui relèvent du fantasme.⁵ La biologie de synthèse et les nanotechnologies englobent des ensembles d'outils et de méthodes qui peuvent être appliqués à travers un grand nombre d'applications dans des domaines aussi variés que la médecine, la

pharmacie, la cosmétique, l'agriculture, l'énergie, les matériaux, l'environnement, etc.

Arrêtons-nous sur quelques exemples qui illustrent ce potentiel d'applications extrêmement large. L'artémisinine est un médicament qui permet de lutter contre la malaria, même à un stade avancé. Jusqu'en 2001, le coût annuel d'un traitement, avec un produit extrait d'une plante, l'artémisia vulgaris, s'élevait à environ vingt-cinq dollars par personne. Grâce à une approche en six étapes, induite par démarche de la biologie de synthèse, la production a été améliorée d'un facteur de dix millions et le coût du traitement pourrait être ramené à environ deux dollars dans les deux ans à venir. Toujours dans ce domaine, des systèmes biologiques, construits pour être implantés dans l'organisme, devraient permettre de traiter de manière plus efficace qu'aujourd'hui certaines pathologies. Certains ont déjà montré leur efficacité chez la souris. Ainsi, un traitement de la « goutte » qui consiste, grâce à un implant fonctionnant comme un système « senseur pompe », à abaisser le taux d'acide urique dans le sang.

5. David Larousserie, « Les nanovoitures entrent en piste », *lemonde.fr*, 17 janvier 2013 : www.lemonde.fr/sciences/article/2013/01/10/les-nanovoitures-entrent-en-piste_1815112_1650684.html

C'est la diminution des cristaux d'acide urique au niveau des articulations qui soulage alors les souffrances du patient. A la frontière entre l'environnement et la santé, un « bio senseur à arsenic », en cours de développement, devrait fournir à plus de cent millions de personnes un système d'alerte prévenant de la toxicité de l'eau de puits.

Dans un domaine tout à fait différent, celui de la production de carburants, des projets sont en cours de développement pour produire directement les « bonnes molécules ». Ils combinent la sélection raisonnée des organismes les plus appropriés, l'ingénierie enzymatique et l'ingénierie des génomes. Par exemple, les micro-algues, dont il existe plusieurs centaines de milliers d'espèces dans les océans, sont en mesure de produire des lipides pouvant être utilisés comme carburant. Certaines sont d'ores et déjà en mesure de produire des lipides avec un rendement à l'hectare plus important que celui des plantes oléagineuses (colza, tournesol, etc.), mais à un coût encore trop élevé. Les recherches pourraient aboutir au cours des deux prochaines décennies.

Comme la biologie de synthèse, les nanotechnologies ne sont orientées vers aucune application spécifique, mais elles s'en distinguent par le fait qu'elles envahissent notre quotidien depuis une dizaine d'années. En 2010, 1317 produits contenant des nanomatériaux étaient recensés sur le marché français (dentifrices, shampoings, lessives, peintures, emballages alimentaires, lunettes, chaussettes, raquettes de tennis, pneus, batteries, téléphones portables, micro-ordinateurs, etc.). Plus spécifiquement, mentionnons les nanoparticules de dioxyde de titane qui ont la propriété de filtrer les UV et de ne presque pas diffuser la lumière visible ; elles permettent d'obtenir des crèmes solaires plus efficaces. Mentionnons également l'utilisation de nanofilms de silicium, selon des arrangements spécifiques, dans les cellules voltaïques de demain, qui pourraient permettre des rendements d'au moins 50 %, alors qu'ils ne dépassent pas 20 % lorsque des composés de silicium massif sont utilisés. Ou encore l'incorporation de nanoparticules d'argent dans les fibres textiles qui permet d'améliorer leur propriété thermique, leur résistance à l'eau, au feu ou à l'abrasion, mais aussi d'éliminer les bactéries ou

d'éviter les mauvaises odeurs. Au-delà de ces applications déjà sur le marché, l'industrie du textile envisage, par l'incorporation de nanocapteurs, de pouvoir proposer des vêtements aux fonctions multiples, par exemple capables d'identifier un état physiologique particulier.

Mais c'est dans le domaine des ordinateurs que les progrès les plus impressionnants ont été accomplis : leur puissance est en effet passée de quelques opérations par seconde il y a une soixantaine d'années à plusieurs millions de milliards aujourd'hui pour les plus performants. La recherche actuelle tente de nouvelles approches basées sur des assemblages d'atomes, ouvrant ainsi la voie vers l'électronique moléculaire.

De nouvelles révolutions industrielles ?

Beaucoup pensent aujourd'hui que ces technologies seront à l'origine de nouvelles révolutions industrielles, et donc de bouleversements sociaux et économiques. D'ici vingt ans, la biologie de synthèse pourrait enclencher des

dynamiques de développements technologiques, industriels et économiques équivalentes à celles provoquées par les évolutions de la chimie. On estime même, comme ce fut d'ailleurs le cas pour l'artémisinine, que la biologie de synthèse pourrait se révéler plus efficace et plus économique que ne l'a jamais été la chimie de synthèse.

Quant aux nanotechnologies, certains n'hésitent pas à pronostiquer qu'elles pourraient avoir un impact sur le développement industriel comparable à celui qu'ont eu, en leur temps, la machine à vapeur ou la maîtrise de la production d'électricité. Toutefois, contrairement à ce que l'on observe pour la biologie de synthèse, l'industrialisation de nanoproduits est déjà en cours, et la France a su développer des pôles de compétence au niveau mondial. Selon certaines analyses prospectives, le marché mondial des nanotechnologies pourrait atteindre plus de mille milliards de dollars à l'horizon 2015 et concerner plus de deux millions d'emplois.

Des questions éthiques et sécuritaires

Tout progrès scientifique ou technologique qui introduit une rupture dans les pratiques et les modes de pensée suscite inquiétude et réticence dans l'opinion. Nous avons déjà cité les polémiques occasionnées par la question des organismes génétiquement modifiés (OGM) ; nous pouvons ajouter celle liée à l'incorporation de nanomatériaux dans des produits commercialisés. Les ruptures technologiques que nous avons évoquées à propos de la biologie de synthèse et des nanotechnologies renforcent la conviction qu'une prise en compte précoce des questions éthiques et des risques qu'elles peuvent engendrer est une urgence politique.⁶

D'un point de vue scientifique et technologique, il est légitime de s'intéresser à une construction biologique ou à une construction moléculaire avant tout pour ce qu'elle

va pouvoir faire ou produire, mais se limiter à cela est socialement insuffisant.⁷

Le fait d'avoir comme perspective de construire un organisme « naturel ou non » et/ou capable de faire ce que la nature ne sait pas faire pose des questions éthiques et des questions de biosécurité qui ne peuvent être éludées. Ainsi, le devenir d'un organisme « non naturel », s'il était volontairement ou accidentellement libéré dans l'environnement et/ou introduit dans la chaîne alimentaire, doit faire l'objet d'une réflexion attentive de manière à ce que les risques soient correctement évalués et que des mesures adaptées soient mises en œuvre pour les prévenir. Or des mesures de sécurité sont possibles : par exemple, soumettre la croissance d'un tel organisme à la présence d'un substrat qui n'existe pas dans la nature, ou ne pas permettre sa répllication parce que son code génétique serait différent de celui des organismes naturels, le

6. Cf. CESC, « Quels développements scientifiques et technologiques pour quelle société ? Et selon quels processus démocratiques de décision ? », juin 2010, et « Sciences, technologies et démocratie », *Le Cahier du CESC*, mars 2011.

7. Cf. Geneviève Fioraso, *op. cit.* ; Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, « The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies », décembre 2010 : www.bioethics.gov ; « Nanotechnologies, éthique et politique », Editeur A.M.J ten Have, Editions UNESCO, Collection Éthiques.

rendrait totalement incapable de se propager dans un environnement naturel.

Nous ne sommes plus alors dans la science-fiction, mais bien dans une perspective à court terme... voire déjà dans la réalité d'aujourd'hui. Le fait qu'un scientifique américain, spécialiste de l'ingénierie des génomes et connu pour ses communications fracassantes, soit allé jusqu'à sous-entendre qu'il « jouait à Dieu » marque bien cette nécessité et cette urgence. Et il ne serait pas acceptable de gommer les réalités nouvelles par un simple changement de vocabulaire : parler d'« ingénierie de la biologie » à la place de « biologie de synthèse » ne peut en aucun cas dissimuler le fait que, *in fine*, ce sont bien des organismes génétiquement modifiés qui sont produits, voire des organismes « non naturels ».

Compte tenu des produits déjà sur le marché, tout conduit à admettre que les nanomatériaux se retrouvent dans les organismes et, plus généralement, dans l'environnement. Il est surprenant que leur mise sur le marché ait précédé

toute analyse « bénéfique/risque ». Il a pourtant été prouvé que les nanoparticules peuvent s'immiscer dans l'organisme par voie cutanée, digestive ou encore par inhalation, et par conséquent circuler dans le corps. Il y a quelques années déjà, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) mettait en garde sur le « manque de données fiables disponibles sur la caractérisation des dangers liés aux nanomatériaux ».⁸ Un programme européen coordonné par l'ANSES, Nanogenotox, a été lancé en 2010, avec comme objectif « d'élaborer une méthode alternative, robuste et fiable de détection du potentiel génotoxique des nanomatériaux susceptibles d'engendrer un risque de cancer ou de toxicité pour la reproduction chez l'homme ».⁹ Mais le séminaire de clôture du programme, en février 2013, a apporté plus de questions que de réponses définitives.

8. Table ronde sur l'application de la loi Grenelle 2, Assemblée nationale, octobre 2012.

9. ANSES, « Towards a method for detecting the potential genotoxicity of nanomaterials », mars 2010 : www.nanogenotox.eu

L'incorporation de nanoparticules dans certains produits tels que des lessives, des crèmes solaires, des médicaments et même dans la nourriture, ne peut que conduire à leur libération dans l'environnement, en particulier *via* les eaux usées. La question est de savoir si des organismes, animaux, plantes ou micro-organismes, en contact avec ces nanoparticules dans leur milieu naturel, en sont affectés. Des expériences, réalisées avec des poissons et des poulets, semblent montrer que les troubles physiologiques observés sont directement liés à l'exposition à certains nanomatériaux.

LES RESPONSABLES POLITIQUES FACE AUX ENJEUX DES NOUVELLES TECHNOLOGIES

Ces technologies ne se développent pas de façon autonome et univoque, et leur pleine maturité industrielle n'apparaîtra pas avant une à deux décennies ; il est donc encore temps pour les politiques et les citoyens de leur donner du sens dans un projet de société. Par ailleurs, toutes les cultures ne réagissent pas de la même façon face à ces nouvelles technologies, ce qui influence les approches réglementaires et le niveau des efforts de recherche et développement en leur faveur. Ainsi l'Europe autorise-t-elle l'importation de grains génétiquement modifiés (GM) utilisés principalement pour l'alimentation du bétail, mais d'une manière générale, elle ne se montre favorable ni à la culture ni à la consommation de plantes génétiquement modifiées, avec certes des nuances entre les vingt-sept pays de l'Union. L'Autriche les refuse catégoriquement, tandis que la France utilise de *pseudo*-arguments scientifiques pour en refuser la culture tout en acceptant d'en importer, et alors que la

Grande-Bretagne, qui a une attitude plus souple à leur égard, n'en cultive pas. En revanche, l'Espagne est le seul pays qui en cultive sur des surfaces significatives, mais qui restent confidentielles au regard des 170 millions d'hectares cultivés au niveau mondial avec des plantes GM.

A l'inverse, les pays d'Amérique possèdent près de 80 % des surfaces cultivées avec des plantes GM (dont la moitié pour les seuls Etats-Unis), l'Asie représentant près de 12 % des surfaces. Dans ces régions, les surfaces et le nombre des espèces cultivées augmentent chaque année, mais c'est aussi là que les efforts de recherche et développement sont les plus importants (Etats-Unis, Brésil, Chine et Inde).

S'agissant des nanotechnologies et de leur régulation, des réactions contrastées sont aussi observées. En Allemagne, où la liberté de la recherche (clairement distinguée de ses usages) est inscrite dans la Constitution, il y a eu un refus net d'envisager une quelconque réglementation de la recherche dans les nanosciences. En Grande-Bretagne, la Royal Society, qui bénéficie d'une grande confiance dans

l'opinion, prône des campagnes éducatives ciblées en direction de la population, plutôt qu'une régulation. En France, en 2009, le gouvernement a demandé à la Commission nationale du débat public (CNDP) de recueillir interrogations, attentes et suggestions sur les options générales en matière de développement et de régulation des nanotechnologies. Cette expérience a été calamiteuse à deux titres. D'une part, les débats n'ont pas pu avoir lieu dans de nombreuses villes parce qu'ils ont été empêchés en raison de manifestations parfois violentes. D'autre part, alors que le processus de débats publics était lancé, le gouvernement a annoncé avec fracas qu'il entendait soutenir fermement l'industrie des nanotechnologies, ce qui fut perçu comme une provocation.

Sans méconnaître les spécificités françaises, il importe que nos responsables politiques expriment une attention plus marquée aux évolutions scientifiques et technologiques en cours et à leurs conséquences éventuelles sur les structures économiques et sociales. Cela devrait les conduire à adopter une démarche plus proactive que

réactive, comme cela a trop souvent été le cas, à introduire une plus grande clarté dans les choix des politiques scientifiques et technologiques, et une plus grande transparence des processus de décision.

A ce stade, on ne peut que mentionner le paradoxe de la situation française concernant le traitement sociétal des produits issus des biotechnologies comparativement à celui des produits issus des nanotechnologies. Alors que, dans le cas des plantes génétiquement modifiées, aucun risque avéré n'a été mis en évidence de manière claire, tant pour la santé humaine que pour l'environnement, elles sont bannies de culture et de consommation. En revanche, certains nanomatériaux qui présentent des risques avérés pour l'homme et pour l'environnement, certes, sans que l'appréciation de leur niveau de danger soit encore précisée, sont légalement commercialisés.¹⁰ Cette disparité de traitement devrait sérieusement interpeller les responsables politiques.

10. Angela Bolis, « Nanoparticules : l'ingrédient qui s'est discrètement invité à notre table », *lemonde.fr*, 31 décembre 2012.

Des lois cadres dans tous les domaines scientifiques et technologiques

Les responsables politiques sont parfaitement habilités à accepter ou à refuser, pour des raisons non scientifiques, le développement de telle ou telle technologie, mais ils doivent l'assumer complètement, le faire dans la clarté et dans des conditions démocratiques. Pourtant, force est de constater qu'ils nous ont surtout habitués à des prises de position confuses, qui, au risque de dévaluer la science elle-même, mélangeaient science, risque, éthique et économie.

Il serait souhaitable que le gouvernement s'inspire davantage des principes de fonctionnement du Comité bioéthique qu'il a lui-même institué, et qui inspire la Loi bioéthique, pour tous les domaines de recherche scientifique et technologique. Il y a des choix de société, comme l'encadrement strict du recours à la « procréation médicalement assistée » ou l'interdiction de la « gestation pour autrui », qu'il ne saurait être question de contester parce qu'ils sont faits démocratiquement et assumés en tant

que tels. Et cela, même si, au regard de choix différents faits par d'autres pays, des arguments de perte de compétitivité scientifique, technologique et industrielle peuvent y être opposés.

Le gouvernement devrait ainsi proposer des lois cadres qui définiraient, pour une période donnée, les principes de sa politique et les conditions de sa mise en œuvre. De ce point de vue, il est regrettable que les propositions de certains députés, membres de l'OPECST, allant dans ce sens, n'aient pas plus d'écho et restent marginales. L'organisation de débats parlementaires permettrait d'apporter des réponses claires aux questions que nous avons posées en introduction sur l'état de maturité industrielle d'une technologie et sur le niveau de l'effort de soutien nécessaire à son développement.

S'agissant de la biologie de synthèse, tous les avis d'experts concordent pour considérer, d'abord, que le domaine est mature et que des projets préindustriels peuvent déjà être proposés ; ensuite, que la France a des formations de haut

niveau qui allient la démarche du scientifique à celle de l'ingénieur, ainsi que des équipes de recherche de qualité reconnues au niveau international ; qu'il existe par ailleurs en France des industries aptes à assurer la valorisation des applications ; enfin que les conditions d'acceptabilité sociétale, en matière d'identification et de gestion des risques, ont été définies et que des mesures ont été proposées pour les mettre en œuvre. En d'autres termes, c'est maintenant qu'il faudrait mettre en place les conditions d'un soutien à un domaine qui pourrait assurer à la France une position de pionnière et qui pourrait générer un nombre important d'emplois dans les années à venir.

S'agissant des nanotechnologies, la situation est à la fois plus simple et plus compliquée. Plus simple parce que la France dispose d'excellents laboratoires de recherche, tant publics que privés, et parce que des industriels sont déjà opérationnels avec plus de mille produits sur le marché incorporant des nanomatériaux. Il suffirait donc d'un soutien public plus marqué pour que la France occupe une position internationale de premier plan. Mais la situation

est aussi plus compliquée parce que des interrogations sérieuses existent sur les risques pour l'homme et pour l'environnement que pourraient engendrer des nanomatériaux incorporés dans des produits déjà commercialisés dans la mesure où la traçabilité des nanomatériaux, dans le corps et dans l'environnement, reste encore quasi inaccessible. De ce point de vue, une étape importante a été franchie avec l'obligation pour les fabricants, importateurs et distributeurs de nanoparticules, à partir du 1^{er} janvier 2013, de déclarer à l'ANSES les quantités et leurs usages dès lors qu'ils produisent, importent ou distribuent au moins cent grammes par an de nanoparticules. Il en est de même pour l'obligation de mentionner la présence de nanoparticules sur les emballages des produits. Toutefois, il faut reconnaître que ces mesures ne renseignent pas sur les risques potentiels consécutifs à l'exposition à de tels matériaux (c'est l'exemple des « nanotitane » dans les crèmes solaires). Quelles seraient les réactions de l'opinion si ces risques étaient avérés ? A n'en pas douter, la confiance dans la parole des experts et des politiques serait à nouveau mise en doute.

Redonner confiance à l'opinion publique

La confiance dans la parole des experts et des politiques est sans doute un des domaines qui, au cours des dernières décennies, a été le plus mis à mal dans notre pays, et pas seulement pour des aspects concernant des choix scientifiques ou technologiques. Redonner confiance à l'opinion publique par des actes devrait donc être, aujourd'hui, une des priorités des pouvoirs publics. S'agissant des questions d'éthique et de biosécurité, il importe de tirer tous les enseignements de l'histoire calamiteuse des OGM dans notre pays, mais aussi des débats impossibles sur les nanotechnologies.

Cette quête d'une confiance retrouvée impose une réévaluation en profondeur de la fonction, de l'importance et du positionnement des différents niveaux qui concourent à sa construction.¹¹

11. Cf. les deux études du CESC précédemment citées.

Les instances d'évaluation

L'Etat s'est doté de structures chargées de lui fournir des avis sur des questions qui requièrent des compétences qu'en général ne possèdent pas les responsables politiques (médicament, sécurité sanitaire et alimentaire, sûreté nucléaire, biotechnologies, ondes électromagnétiques, environnement, etc.). C'est sur la base de ces avis que les pouvoirs publics sont censés, en dernier ressort, prendre les décisions qui doivent garantir aux citoyens que, les risques ayant été correctement évalués, les mesures de prévention adaptées ont bien été prises.

Le pouvoir politique est parfaitement fondé à ne pas suivre les recommandations formulées par ces commissions qu'il a lui-même nommées, mais il ne peut le faire, comme cela a trop souvent été le cas, en mettant en cause les avis des experts de ces mêmes commissions.

L'expertise et les conflits d'intérêt

Le principe même de l'expertise est qu'elle doit être non

contestable, aussi bien par les responsables politiques que par l'opinion. Les premiers parce que l'expertise constitue un élément déterminant dans leurs décisions, la seconde parce que l'expertise détermine la confiance qu'elle peut avoir dans l'innocuité d'un produit commercialisé ou de la technologie mise en œuvre. Or les exemples sont nombreux (amiante, tabac, hormone de croissance, Mediator, etc.) qui montrent que les avis émis par les comités d'évaluation avaient été biaisés par négligence ou par intérêt, et que la réalité des risques avait été sous-évaluée, voire occultée.

En conséquence, il est impératif et urgent de prendre des mesures afin que la nomination des experts se fasse avec la plus grande rigueur, que la déclaration de conflit d'intérêt soit obligatoire et qu'une instance adaptée soit chargée de vérifier que tout se passe selon les règles.

L'éducation

L'évolution de plus en plus rapide des sciences et des technologies rend leur compréhension par les citoyens de plus

en plus difficile. Cela devrait imposer un renforcement de l'enseignement scientifique à tous les niveaux de la formation des jeunes, dès l'école élémentaire. Or c'est l'inverse qui est constaté depuis quelques années. Le système éducatif a une responsabilité toute particulière dans ce processus de reconquête. L'effort engagé autour de « La main à la pâte », initiée par Georges Charpak, est un bon exemple de ce qu'il conviendrait d'encourager.¹²

L'enseignement de l'histoire des sciences et des techniques devrait être renforcé et généralisé à tous les niveaux et faire partie intégrante du cursus de toute formation scientifique. Un tel enseignement permettrait de sensibiliser les enfants et les étudiants à une réflexion prospective sur les innovations technologiques et à leurs conséquences sur la société, et donc de mieux les préparer à une attitude réfléchie et responsable face aux ruptures technologiques à venir.

12. La Fondation La main à la pâte a pour mission de contribuer à améliorer la qualité de l'enseignement de la science et de la technologie à l'école primaire et au collège.

L'information

La fréquence et la qualité des informations diffusées par les médias ne correspondent pas à l'importance des bouleversements qu'engendrent les innovations technologiques sur nos structures sociales et économiques, et donc sur nos habitudes et nos modes de vie. Afin que les citoyens aient une perception équilibrée et non biaisée des enjeux scientifiques et technologiques, le cahier des charges des chaînes publiques de radio et de télévision devrait être reconsidéré en conséquence. Le rôle du Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA) devrait être précisé et affirmé pour introduire davantage d'espace aux questions scientifiques et technologiques et pour veiller au respect de certaines règles déontologiques dans leur traitement. Enfin, les scientifiques des instituts publics de recherche devraient être incités à venir devant l'opinion davantage qu'ils ne le font aujourd'hui, afin d'expliquer le sens de leurs travaux, d'un point de vue scientifique, mais aussi d'un point de vue sociétal, et ceci en des termes accessibles à tous.

Réaffirmer le rôle des pouvoirs publics dans les processus de décision

D'une manière générale, les citoyens attendent des responsables politiques qu'ils donnent du sens à l'action publique. S'agissant particulièrement des politiques scientifiques et technologiques, les pouvoirs publics disposent, à tous les niveaux de l'Etat et des collectivités territoriales, de comités de toutes sortes : comités d'information et de recommandation, comités d'homologation, mais aussi comités strictement limités aux débats.

Il serait sain et urgent, dans cette période de grande confusion quant à la crédibilité de tous ces comités, de redéfinir de manière claire et solennelle leur rôle et leur positionnement dans le processus de décision. Mais les pouvoirs publics devraient aussi réaffirmer que c'est *in fine* au Parlement qu'il revient de définir par un vote les grandes orientations en matière de politique scientifique et technologique.

Structuration et organisation du débat public

Compte tenu des expériences récentes, il est nécessaire de trouver rapidement les conditions qui permettent de répondre, dans la clarté et dans la transparence, aux demandes de l'opinion sur les objectifs poursuivis par les programmes de développement des nouvelles technologies, sur l'état des travaux dans les domaines concernés, ainsi que sur les questions sociétales que pose la diffusion des produits qui en sont issus. L'exigence de débats publics est souvent revendiquée par le monde associatif pour traiter de toutes ces questions. Mais il faudrait affirmer avec clarté qui débat et avec quelle représentativité. Et lorsque l'on débat, est-ce pour donner un avis ou pour décider ?

Geneviève Fioraso, aujourd'hui ministre de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, a donné, dans son rapport de 2012¹³, des pistes de réflexion très pertinentes qui devraient être diffusées plus largement qu'elles ne l'ont été, parmi les responsables politiques, les journalistes, les

13. Cf. Geneviève Fioraso, *op. cit.*

enseignants et les étudiants. Il n'est en effet plus possible de persister à mettre en œuvre, dans l'opacité, des technologies qui sont socialement controversées. Elle suggère également que, pour certains projets qui traitent de thématiques prêtant (ou pouvant prêter) à polémique, des sociologues soient associés aux équipes de recherche tout au long de l'étude.

Renforcement de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Le Parlement vote les budgets, en particulier ceux de la recherche, mais il ne marque que rarement cet acte essentiel par des débats et des votes spécifiques sur les choix scientifiques et technologiques du pays. L'Office parlementaire d'évaluation de choix scientifiques et technologiques (OPECST) produit des rapports de qualité sur nombre de questions scientifiques et technologiques, mais l'observation montre qu'il n'a qu'un rôle marginal dans le travail parlementaire et qu'il est méconnu du grand public.

Il faut donner au Parlement un rôle plus actif et plus visible par l'opinion sur son engagement vis-à-vis des stratégies de recherche scientifique du pays. Qu'il s'agisse, par exemple, des politiques agricoles, énergétiques, environnementales, industrielles ou de santé publique, les choix effectués sont déterminants pour l'avenir du pays, à moyen et long terme. Ce rôle prééminent que nous souhaiterions voir donner au Parlement devrait donc se traduire par des lois cadres sur les grands enjeux scientifiques et technologiques. De telles lois cadres donneraient de la lisibilité à l'action gouvernementale en même temps qu'elles apporteraient aux citoyens un éclairage sans ambiguïté sur la direction suivie. Elles devraient être revisitées périodiquement afin d'en assurer le suivi et, le cas échéant, de permettre les ajustements nécessaires.

Cette orientation implique que le rôle et la responsabilité de l'OPECST dans le travail parlementaire soient renforcés. Il devrait avoir une responsabilité davantage soulignée dans l'organisation du travail parlementaire, dans le suivi de la politique gouvernementale, et dans l'alerte du

gouvernement à l'égard des évolutions des sciences et des technologies. Mais il pourrait aussi être envisagé de lui confier un rôle pérenne dans l'organisation de débats publics et dans l'information de l'opinion en liaison avec la chaîne parlementaire.

CONCLUSION

Les années 1970 ont vu s'effondrer la croyance en un progrès scientifique et technique linéaire qui engendrerait un progrès automatique pour la société humaine. On est alors entré dans une phase de désenchantement, mélange de critiques et de tentatives d'explorer d'autres voies, vers un monde moins consommateur et plus solidaire. Sans renier les critiques, qui sont légitimes, ni l'affirmation du primat de la fraternité sur la consommation de biens, il nous faut aujourd'hui réaffirmer l'importance d'un engagement dans le progrès scientifique et technique. D'abord parce qu'il est nécessaire pour faire face à la croissance démographique et à la protection des écosystèmes menacés, ensuite parce que, même si nous ne participions pas à la progression globale des connaissances, celle-ci refluerait sur nous, au grand dam de notre balance commerciale.

Les technologies, qui sont de fait imposées par le marché, ont un effet sur la société au moins aussi important que les décisions politiques : la pilule contraceptive, la téléphonie

portable, la messagerie électronique, les réseaux sociaux ont modelé les comportements collectifs, les échanges industriels, la circulation financière, les débats démocratiques, et même la vie sexuelle. Mais pouvons-nous nous en remettre au seul marché pour construire la société de demain ? Pouvons-nous laisser le marché façonner les esprits et les comportements ? Le monde politique n'a-t-il pas un rôle à jouer pour aider les citoyens à reconquérir leur liberté à l'intérieur de ce marché ?

Ces vingt dernières années, le champ des sciences et des technologies a été partiellement déserté par les politiques, dans un quasi-aveu d'impuissance qui contrastait avec le volontarisme manifesté par le début de la V^{ème} République et le début des années 1980. Les quelques parlementaires qui se sont fermement engagés dans les travaux de l'Office parlementaire de l'évaluation des choix scientifiques et technologiques sont restés bien seuls.

Les chercheurs et les ingénieurs avancent dans leur logique, sûrs de leur légitimité à tenter de trouver des

solutions aux problèmes qui leur sont posés. Les progrès technologiques s'effectuent à une vitesse inconnue du grand public, comme dans les domaines du photovoltaïque, de la biologie de synthèse ou des nanomatériaux. Les industriels avancent également avec leur propre logique, conduits par la nécessité de la compétition économique pour demeurer des acteurs du marché. De leur côté, les hommes et les femmes politiques tendent à adopter une attitude qui s'apparente à du suivisme. Ils contribuent au financement des recherches, mais ils dénoncent aussi les effets nocifs identifiés des évolutions technologiques que le marché a imposées. Les citoyens sont perdus ; ils sont craintifs devant un inconnu dont l'échelle immense (le réchauffement climatique) ou microscopique (les nanoparticules) échappe à leur imagination, et pourtant séduits par l'utilisation de ces mêmes technologies lorsqu'elles leur apportent des commodités. Dans ce désarroi, le marketing triomphe, le lobby est roi.

Alors, faut-il renoncer à toute intervention démocratique sur l'évolution des sciences et des techniques ? Dans une

économie mondialisée, chercheurs et ingénieurs se réfèrent à des échelles de temps qui ne sont pas celles des débats ouverts à toute la population, nécessairement longs et nécessitant de très importantes mises à niveau informatives. Il serait vain d'attendre de la Commission nationale du débat public qu'elle traite tous les problèmes comme on débat du tracé d'une ligne à grande vitesse, sujets dans lesquels tous les citoyens peuvent se faire une représentation relativement claire de ce qui est en projet. Mais la discussion devient très difficile pour les sujets dont les impacts peuvent difficilement être visualisés : les ondes électromagnétiques (téléphonie portable), les champs magnétiques générés par les courants forts (lignes à haute tension), les fréquences émises par les éoliennes, le franchissement des membranes cellulaires par les nanoparticules. L'absence de représentation de ces phénomènes peut soit laisser les citoyens indifférents, soit permettre de manipuler l'opinion. A l'inverse, certains sujets très médiatisés, comme les images de Tchernobyl et de Fukushima, ont généré chez les citoyens des représentations qui paralysent toute possibilité de réflexion. Sur ces sujets, le

débat public demande à être précédé d'un apprentissage permettant au public de s'approprier de manière pédagogique une information que l'on voudrait pluraliste, destinée à dissoudre les fantasmes et à faire progressivement émerger les points centraux. Les tentatives jusqu'ici ont échoué, et notamment le débat sur les nanotechnologies ; les organisateurs et l'organisation étaient de qualité, mais son échec conduit à penser que la démocratie directe reste dans ces domaines un doux rêve. Il faut donc redonner de la crédibilité aux institutions intermédiaires entre l'homme de la rue et le décideur final.

Et d'abord, il faut rétablir des lieux de rencontre et de confrontation entre tous ces acteurs qui suivent chacun leur voie. Chercheurs, ingénieurs, industriels, syndicats, associations, tous sont comme des trains lancés à grande vitesse sur leur axe propre, sans points de rencontre. En ce sens, il est regrettable que le Commissariat au plan, qui permettait à divers acteurs de se rencontrer autour de ces questions, ait été démantelé.

La reconstruction est peut-être en cours à travers la nouvelle instance qui vient de naître, le Commissariat général à la prospective et à la stratégie. Parviendra-t-il à reconstituer un lieu de confrontation entre les multiples acteurs de la société civile, chercheurs, industriels, syndicats de salariés et syndicats patronaux, associations, éducateurs et formateurs ? C'est notre vœu.

DEUXIEME PARTIE

La politique de l'énergie face aux nouvelles technologies

Robert Chapuis

INTRODUCTION

Lors des législatives de 2012, les trois quarts des électeurs de gauche se sont déclarés favorables à davantage de débats sur la politique énergétique. L'accident de Fukushima au Japon, le 11 mars 2011, a accru la sensibilité à la question nucléaire, et les Français sont encore plus conscients qu'il importe d'engager des réformes profondes sur le sujet. Ils sont très nombreux à souhaiter que l'on diminue de manière significative la part des énergies

Robert Chapuis est inspecteur général honoraire de l'Education nationale. Député de l'Ardèche (1981-1988), il a été rapporteur du Budget de la recherche et fut à l'origine de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Délégué national du Parti socialiste à la Technologie (énergie, industrie, recherche) de 1975 à 1979, il a ensuite été secrétaire national du PS. De 1988 à 1991, il a été secrétaire d'Etat chargé de l'Enseignement technique dans le gouvernement de Michel Rocard.

nucléaires et fossiles au profit des énergies renouvelables. C'est pourquoi il est indispensable de débattre de l'avenir des nouvelles technologies de production de l'énergie, certes, mais aussi de son stockage, puisque les énergies renouvelables (éolien, solaire, etc.) nécessitent une régulation dans le temps et l'espace. S'y ajoute bien entendu la nécessaire réflexion sur les usages et la consommation qu'il faut savoir maîtriser. C'est dans ce cadre que se pose la question de l'électricité et des réseaux qu'elle suppose : comment les rendre plus « intelligents » et mieux adaptés à la diversité des usages ? Pour nourrir ce débat, on examinera d'abord les leçons de la prospective et de la recherche, puis les données à prendre en compte, enfin les choix politiques en matière d'énergie qui peuvent concilier les exigences du développement durable et celles de la justice sociale.

LES LEÇONS DE LA PROSPECTIVE ET DE LA RECHERCHE

Durant les années 1970, un problème majeur se posait : répondre à la hausse de la consommation en matière d'énergie. On s'attendait à un doublement des besoins en électricité tous les dix ans, d'autant que l'électricité semblait pouvoir répondre à la plupart des besoins dans l'industrie, les habitations, les usages ménagers, les transports en commun. Les chocs pétroliers de 1974 et 1980 ont mis en évidence les limites de la ressource tirée des énergies fossiles. La France qui « n'a pas de pétrole » en a déduit qu'il fallait intensifier la production d'électricité d'origine nucléaire, d'autant que notre pays avait dans ce domaine une remarquable avancée technologique : le CEA¹ pouvait maîtriser le cycle complet de l'uranium (de la production au retraitement) et EDF savait construire des centrales à partir d'une technologie certes empruntée aux Américains, mais adaptée aux spécificités du territoire français.

1. CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

On ne développera pas ici l'ensemble des questions posées par l'intensité et l'extension de ce programme nucléaire, mais il importe de souligner les conditions dans lesquelles s'est effectuée la recherche technologique en France. Elle a été structurée par de grands organismes qui étaient liés à l'industrie autant qu'à l'Etat par le programme nucléaire. Il est significatif que, pour apporter des moyens à la recherche sur les nouvelles sources d'énergie, il ait fallu s'appuyer sur le CEA, dont le nom a évolué en Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Au cours des années 1990, un nouveau critère est apparu, au-delà de la satisfaction des besoins de consommation, celui de la lutte contre le réchauffement climatique. Le développement des énergies qui émettent du CO₂ dans l'atmosphère, provoquant un effet de serre dont les conséquences se font sentir sur l'équilibre planétaire, a poussé à la recherche d'alternatives à la fois crédibles et suffisantes. En 1974 déjà, le rapport de David Freeman pour la Fondation Ford (parallèlement aux travaux du Club de Rome sur la nécessaire limitation du

« progrès » en matière de production énergétique) avait montré la possibilité de dégager une alternative au nucléaire grâce aux énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire.² L'accident de Three Miles Island avait en effet réduit les ardeurs pro-nucléaires aux Etats-Unis.³ Après Tchernobyl, en 1986, le mouvement antinucléaire s'est encore étendu en Europe, d'abord en Allemagne, puis en France. Au nom de l'écologie, on a intensifié la recherche d'une alternative qui réponde à la fois à la lutte contre le réchauffement climatique et aux risques que les centrales nucléaires font courir aux populations.

Les scénarios du futur

Dans cette perspective, l'Union européenne a financé des programmes de recherche visant à élaborer divers scénarios du futur (2000-2050). Si l'on s'en tient aux grandes lignes

2. S. David Freeman, *Exploring energy choices: a preliminary report of the Ford Foundation's energy policy project*, Ford Foundation, Washington, 1974.

3. En mars 1979, la centrale nucléaire de Three Miles Island, en Pennsylvanie, a subi un dysfonctionnement de son système de refroidissement, qui a provoqué une fusion partielle en bas du cœur du réacteur. Cet accident a entraîné le déversement d'une importante quantité de radioactivité dans l'environnement.

des résultats de cette recherche, quatre scénarios possibles se dégagent :

- Un scénario du laisser-faire (qui impliquera l'utilisation croissante d'énergies fossiles) : on aura une augmentation d'environ six degrés de la température à l'échelle mondiale, avec de lourdes conséquences,
- Un scénario global (une politique globale avec réduction des énergies fossiles, limitation de la consommation, une taxe carbone à un haut niveau – quatre cents euros par tonne de CO₂) : la température grimpera de deux degrés,
- Un scénario européen : à elle seule, une politique européenne, avec un faible accroissement des gaz à effet de serre et avec une taxation de la tonne de CO₂, en Europe, dans une fourchette de 50 à 300 euros (en euros de 2008) selon les scénarios, permettrait de limiter la hausse de la température à quatre degrés,
- Un scénario national qui s'inscrirait dans la perspective d'une politique globale : il suppose la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre (facteur 4).⁴

4. La France s'est engagée en 2003 à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre en 2050 (par rapport à leur niveau de 1990). Cet engagement a été validé par le Grenelle de l'environnement en 2007.

Ce dernier scénario, plus fidèle aux engagements du Grenelle de l'environnement, implique de coordonner dans le temps le recul du nucléaire et la montée des renouvelables (l'hydraulique, les courants et marées, l'éolien, le géothermique, le solaire, la biomasse et, à terme, l'hydrogène comme vecteur énergétique). Dans cette perspective, il faudrait réduire la consommation électrique (mais il y a des limites), prolonger la durée de vie des centrales (au-delà de quarante ans), accepter des surcoûts engendrés par les énergies renouvelables : le coût moyen du MWh⁵ avec 75 % de nucléaire est de soixante euros, il monterait à soixante-quatorze euros si le nucléaire est à 50 %. Cette différence (discutable en fonction des coûts de maintenance du nucléaire) semble acceptable.

Depuis l'accident de Fukushima, l'exigence de sûreté s'est accrue pour l'énergie nucléaire, d'où l'augmentation du coût des centrales. L'Allemagne a déjà pris la décision de faire davantage confiance aux énergies renouvelables et intensifie les recherches dans ce domaine.

5. MWh pour Mégawatt heure électrique.

L'avenir de l'électricité

Concernant l'électricité, il faut noter que la France a séparé nettement la production (EDF) et la distribution (ERDF). La fourniture d'électricité pouvait être d'origine différente et l'on a ainsi favorisé l'énergie éolienne et solaire par des subventions ou des prix compétitifs. La recherche en matière d'énergies renouvelables en a bénéficié, mais l'industrie s'est peu engagée, sinon par le biais de PME dont le financement n'était assuré qu'à très court terme et qui étaient donc très sensibles aux aléas de la conjoncture (et de la concurrence).

En matière de technologies, EDF considère que l'électricité peut provenir d'origines très diverses. Il y a des choix. Ils s'inscrivent dans le temps : être au bon moment, sinon on est trop cher, trop tôt (c'est l'exemple de Superphénix)⁶, ou trop tard (l'éolien). Il faut aussi trouver la bonne localisation. Si l'on veut résumer la stratégie d'EDF, il faudrait

distinguer trois types de technologies à l'échelle du temps : celles qui sont au point pour un développement massif, celles qui sont assez mûres pour envisager des prototypes (c'est une échelle entre quinze et trente ans), enfin celles qui sont de l'ordre de la recherche et développement (R&D) qu'il faut améliorer pour passer à l'étape suivante.

Dans les choix, il faut bien distinguer les trois enjeux majeurs. Tout d'abord la croissance : d'ici 2050, on envisage que le PIB mondial aura été multiplié par quatre, qu'il y aura deux à trois milliards d'habitants en plus, que la Chine et l'Inde seront au moins à la moitié du niveau européen. Or, pour 1 % de croissance, il faut compter de 1,3 à 1,5 % de croissance électrique. Pour l'Europe, pour la France, il est essentiel d'engager des économies d'énergie afin que 1 % de croissance se traduise par une augmentation de seulement 0,5 % en électricité.

Autre enjeu important, le climat. On sait l'importance de la contribution des émissions de CO₂ au réchauffement climatique : en Europe le tiers des émissions de CO₂

6. Lancé en 1974, le réacteur nucléaire Superphénix, de la centrale de Creys-Malville, a été fermé en 1998.

provient de la production d'électricité et de chaleur. Aujourd'hui, toujours en Europe, la production d'électricité est assurée à 55 % à partir de combustibles fossiles (charbon, gaz et pétrole) et à 30 % par du nucléaire (le restant est d'origine renouvelable, hydraulique pour l'essentiel). Il existe de très fortes disparités au sein de l'Union européenne : on distingue ainsi d'un côté l'Allemagne, avec neuf tonnes de CO₂ émis par habitant (onze tonnes pour les Pays-Bas) et avec une électricité coûtant 125 à 250 euros par mégawatt heure électrique ; de l'autre, la Suède et la France, avec six tonnes de CO₂ émis par habitant pour un coût de 90 à 200 euros le mégawatt heure (ces coûts sont différenciés dans tous les pays pour les ménages et les entreprises, la moyenne européenne étant dans une fourchette de 115 à 200 euros le kWh). Il faut s'inscrire dans les trois types de technologies indiqués plus haut pour faire les bons choix face au réchauffement climatique.

Enfin, dernier enjeu important, l'évolution des prix de l'électricité : si l'on considère les différentes filières (le gaz, le charbon, l'hydraulique, le nucléaire et l'éolien ter-

restre), on est dans une fourchette de soixante à cent euros le MWh. Si l'on envisageait la capture et le stockage du CO₂ émis par une centrale au charbon (ou à gaz), on augmenterait fortement les coûts de production de l'électricité (ils doubleraient au minimum). L'éolien offshore revient deux à trois fois plus cher, le photovoltaïque, six à huit fois au moins ; quant à la filière nucléaire du surgénérateur, son coût de production de l'électricité est impossible à estimer et il sera certainement supérieur à celui des centrales actuelles. Il faut donc trouver le bon moment pour passer au stade du prototype, puis au stade industriel, en fonction des résultats de la recherche. Il faut aussi trouver le bon endroit pour implanter des installations, notamment pour le solaire. Ainsi pour le photovoltaïque dont la production d'un MWh est aujourd'hui en moyenne de trois cents euros, soit huit fois plus que l'électricité distribuée par le réseau. Mais en Californie où les conditions d'ensoleillement sont très favorables, il coûte seulement 20 % de plus et dans cinq ans, normalement, rien de plus. Il faut voir les conditions les plus favorables à l'installation, sinon les

surcoûts peuvent tuer pour longtemps la technologie. Ainsi, commençons par les régions du Sud, notamment du sud de la France. C'est ce raisonnement qu'il faut faire pour les diverses technologies, en tenant compte également de la demande.

Les nouvelles énergies

Pour les nouvelles énergies, EDF n'intervient pas dans la recherche elle-même. Les financements proviennent des universités, du CNRS, de l'IFP (Institut français du pétrole et énergies nouvelles) et du CEA. Toutefois, l'avenir de la recherche est conditionné par la politique mise en œuvre par l'Etat. On le voit à travers deux exemples concernant l'énergie solaire et le stockage de l'énergie.

D'abord l'énergie solaire. Il existe une filière solaire thermodynamique qui consiste à utiliser la chaleur solaire pour alimenter des turbines qui fourniront l'électricité.⁷ La

7. La France avait connu une bonne avance technologique dans ce secteur, avec Thémis notamment en Cerdagne, mais EDF a préféré l'arrêter. Elle semble vouloir aujourd'hui faire repartir le projet avec l'aide de la Région et du CNRS.

conversion photovoltaïque est cependant la plus importante et la mieux maîtrisée. Elle utilise essentiellement des panneaux selon plusieurs filières : la filière silicium est majoritaire ; les cellules solaires sont en général constituées de couches minces de silicium (pour économiser le matériau). On peut utiliser d'autres semi-conducteurs (par exemple le tellure de cadmium) et on envisage aussi une filière avec des matériaux organiques (des plastiques semi-conducteurs).

Le rendement théorique du photovoltaïque est de 85 %. Il est actuellement à 43 % dans les satellites (avec des cellules comportant plusieurs semi-conducteurs) et au maximum de 20 % pour les cellules commercialisées au silicium. Pour l'améliorer, il faut poursuivre les recherches, mais il faut aussi tenir compte des coûts qui restent importants. On peut néanmoins comparer l'évolution du prix des modules photovoltaïques avec celui des écrans plats : il rejoindra un coût minimum entre 2030 et 2040.

Il y a actuellement deux cent mille installations de panneaux photovoltaïques en France. Elles ont généré vingt-quatre mille trois cents emplois en 2011, à comparer aux cent trente-trois mille en Allemagne et aux cent trois mille aux États-Unis. On sait aussi que la Chine est actuellement le plus gros producteur de panneaux solaires. Elle utilise des procédés classiques ; l'avenir pour l'Europe est dans sa capacité de recherche-développement qui développe de nouveaux concepts et doit permettre des progrès importants dans le rendement et la nature des matériaux, donc dans l'abaissement des coûts de production. La politique industrielle dans ce domaine doit se garder de tout emballer. Les surcapacités de production dans le monde et le *dumping* chinois ont abouti à un dérèglement du marché et mis en difficulté des entreprises du secteur en Allemagne (où les grandes entreprises ont annoncé qu'elles sortaient de la filière solaire), aux États-Unis et même en Chine.

Venons donc maintenant à la question du stockage des énergies renouvelables. Ces dernières proviennent

principalement de l'énergie solaire qui est largement disponible pour quelques milliards d'années ! Elle représente 90 000 TWh (le TéraWattheure valant mille GWh) soit sept mille fois la consommation énergétique mondiale. Autre image : un carré de vingt-cinq kilomètres de côté reçoit chaque année l'équivalent de la production française d'électricité...

L'énergie solaire présente un double handicap : d'abord une densité de puissance faible (très inférieure aux carburants fossiles), ensuite l'intermittence (due à la nuit, aux nuages). Il est donc nécessaire de rechercher concentration et stockage pour convertir l'énergie solaire soit en carburants (biomasse, hydrogène) soit en électricité (photovoltaïque).

Encourageante biomasse

La biomasse résulte d'une utilisation de la photosynthèse naturelle à partir de plantes, d'algues ou de bactéries. Les biocarburants ont évolué à travers trois générations. La première a consisté à obtenir un bioéthanol que l'on peut

mélanger à l'essence (produit par fermentation, à partir de betteraves, de canne à sucre ou de céréales : blé, maïs). La production se partage essentiellement entre les Etats-Unis (41 %) et le Brésil (40 %). Un autre procédé permet, à partir des huiles (colza, tournesol), de produire des « esters » qui constitueront un biodiésel que l'on peut mélanger au gazole. La production annuelle en Europe reste limitée (8 Mtep environ).

Ces carburants présentent des limites évidentes. Pour un faible bilan énergétique, le coût économique (agricole surtout) et environnemental est très important : il faut beaucoup d'eau et la surface agricole diminue. Ainsi, pour couvrir 10 % des besoins en carburants d'Europe ou des Etats-Unis, il faudrait prendre 40 % de la surface agricole. Il y a sans doute aussi un impact sur l'effet de serre. La deuxième génération est plus intéressante. Elle repose sur les matériaux lignocellulosiques qui constituent l'enveloppe végétale : il s'agit d'utiliser les résidus agricoles (paille) ou forestiers, ou d'avoir des cultures dédiées à croissance rapide (eucalyptus, peupliers). On peut alors

produire par gazéification des hydrocarbures que l'on mélange au gazole ou par hydrolyse et fermentation de l'éthanol que l'on mélange à l'essence.

La troisième génération se fonde sur une démarche analogue pour produire un biodiésel, mais il s'agit d'utiliser des algues ou des micro-organismes photosynthétiques dont le rendement est huit fois supérieur à celui des plantes. On peut aussi fixer une quantité importante de CO_2 et les algues n'entraînent pas de conséquences sur la production alimentaire. La possibilité de modifier génétiquement des bactéries, des levures et des algues (par les méthodes de la biologie synthétique notamment) ouvre aussi des perspectives intéressantes.

Enthousiasmante hydrogène

L'hydrogène est peut-être le carburant du futur, parce qu'il part de l'élément le plus simple : l'eau (H_2O). Des piles à combustible peuvent convertir l'énergie chimique en énergie électrique en séparant l'oxygène de l'hydrogène.

De telles piles ont déjà permis à Peugeot de construire un véhicule à moteur électrique de 70 kWh avec une autonomie de cinq cents kilomètres. Il faut encore améliorer le système qui est lourd et encombrant, mais c'est possible.⁸ Le procédé peut être utilisé pour le chauffage, l'eau chaude et les usages électriques d'une maison en le couplant avec des panneaux photovoltaïques sur le toit. Cette installation, avec 55 m² de panneaux et 2,3 litres d'eau par jour, reviendrait de deux à cinq euros par jour (dont un euro pour l'alimentation électrique). Les recherches doivent être développées sur les batteries pour assurer le meilleur stockage possible de l'énergie et la délivrer d'une manière régulière. Par ailleurs, au-delà de la photosynthèse naturelle, des recherches portent sur la photosynthèse artificielle qui utilise des catalyseurs sans métaux nobles et sans surtension, ce qui peut diminuer les coûts.

8. Il faut trouver un catalyseur moins cher que le platine et se placer sur le marché des matières premières, en particulier pour les « terres rares » qui sont l'objet d'une concurrence acharnée.

LES DONNÉES À PRENDRE EN COMPTE

Le contexte global est marqué par deux données incontournables : d'une part la raréfaction des ressources fossiles, d'autre part le réchauffement climatique sous l'effet des gaz à effet de serre.

Dans le premier cas, il importe de trouver des substituts tout en limitant autant que possible les consommations. Il faut aussi tenir compte de la répartition des gisements, de leur coût d'exploitation et des problèmes de transport, d'où l'aspect géopolitique de toute stratégie en matière d'énergie. La France, qui n'a plus de charbon et pas de pétrole, se trouve dans une situation particulière. L'exploitation des gaz de schiste implique des conditions d'exploitation très difficiles sur le territoire français et ne résout pas le problème. Une politique mieux coordonnée entre les pays de l'Union européenne permettrait sans doute de faire face aux difficultés d'approvisionnement, surtout pour le gaz naturel. Mais nous en sommes très loin et chaque pays s'est structuré par lui-même et sur

lui-même dans ses formes d'exploitation comme dans ses négociations avec les pays tiers, qu'il s'agisse de la Russie, de la Norvège ou de l'Algérie.

Dans le second cas, la prise de conscience est inégale. L'évolution des conférences internationales organisées sous l'égide de l'ONU (Sommet de la Terre) montre la pression des besoins de développement à court terme dans les zones à forte démographie qui sont aussi celles des pays émergents. On sous-estime les effets du dérèglement climatique alors même que des catastrophes naturelles (tremblements de terre, tsunamis, cyclones, inondations) montrent la fragilité de la planète. Les pays que l'on dit développés ont forcément une responsabilité dans cette situation.

Le poids du passé

Le choix du « tout nucléaire » en 1974 (programme Messmer) pèse encore aujourd'hui. Au démantèlement des centrales mises à l'arrêt et au traitement des déchets

s'ajoutent la maintenance et la mise en sûreté permanente des centrales existantes. Des investissements sont nécessaires et intéressants puisqu'ils apportent des emplois et assurent un savoir-faire qui peut être exporté, mais ils ne contribuent pas à la production des énergies alternatives qui demanderont d'autres investissements. Il faut donc rechercher d'autres sources de financement que la seule augmentation du prix de l'électricité ou du gaz. Une taxe carbone (en application des politiques climat/énergie) – sans facilité de dérogation – et/ou une contribution des sociétés d'autoroutes seront utiles. Un appui des banques peut être recherché, ne serait-ce que pour amortir les investissements liés aux économies d'énergie dans le bâtiment. Il conviendra aussi d'améliorer la balance commerciale par des exportations vers les pays émergents, dans le nucléaire comme dans les énergies renouvelables.

La sécurité des approvisionnements

A l'échelle du monde, les réserves de charbon ou de gaz restent largement suffisantes probablement pour cent ou

deux cents ans. Elles le sont même peut-être encore au-delà d'un siècle pour le gaz (quelques dizaines d'années de plus en incluant les ressources non conventionnelles). Il y a des différences de coût suivant le mode d'exploitation ou la profondeur des gisements, entre autres, mais on ne dépasse pas les cent euros par mégawatt heure, même en tenant compte des coûts liés à l'environnement. De ce fait, beaucoup de pays continueront à utiliser des ressources fossiles, notamment le gaz. Actuellement, les cycles combinés à gaz se développent aux États-Unis ou en Chine qui consomme aujourd'hui en gaz un sixième de la consommation européenne. Dans les trente ans qui viennent, ce sera autant que nous, avec du gaz venant pour moitié de Russie.

En ce qui concerne la France, on ne peut négliger la nécessaire continuité de l'utilisation de l'électricité et des moyens de chauffage et de circulation, tant sur le plan domestique que sur le plan industriel. L'énergie ne peut manquer. Si l'on peut accepter – difficilement ! – une panne de quelques heures, aucun gouvernement ne peut prendre

le risque d'une interruption, voire d'une limitation drastique des usages et des utilisations pour la population. Il convient donc de garantir les importations nécessaires en matière d'énergies fossiles, en les limitant progressivement avec les accords internationaux que cela implique.

Il faut aussi fixer des étapes intermédiaires crédibles pour la transition énergétique avec les évaluations et les réévaluations nécessaires. C'est pourquoi l'énergie doit demeurer largement dans le secteur public. Il peut y avoir également des sociétés privées avec des participations significatives de l'État et des contrats à moyen ou long terme révisables en fonction des résultats obtenus. Plus que jamais, l'énergie devra être une grande cause nationale.

L'état de la recherche

La France dispose de laboratoires et de chercheurs tout à fait performants dans les domaines liés à la production d'énergie (on l'a vu par exemple pour le solaire photovoltaïque). Concernant le stockage, elle n'est pas aussi

avancée : la question de l'intermittence implique des recherches sur les piles à combustible et sur l'utilisation de la biomasse. Les financements ne sont pas à la hauteur des enjeux. Des sommes considérables sont utilisées pour capter l'énergie des marées ou de nouveaux barrages maritimes. On peut se demander si un effort plus important ne devrait pas être fait sur des technologies qui sont susceptibles d'être à la fois valorisées dans notre pays et exportées vers d'autres pays qui ne disposent pas non plus de ressources fossiles ou ne veulent pas en être trop dépendants, comme en Afrique par exemple.

LES CHOIX POLITIQUES POUR L'AVENIR

Le solaire peut servir encore d'exemple : après des avancées remarquables, avec des aides financières appréciables, le solaire a marqué le pas en France. Dans les années 2000, on a constaté un certain désengagement industriel alors que d'autres pays comme l'Allemagne ou la Chine faisaient le chemin inverse. Ce sont eux aujourd'hui qui engrangent les bénéfices... Dans le domaine du nucléaire, la France s'est voulue en pointe de la recherche et de la technologie. Elle s'est engagée, notamment dans les années 1980, dans la surrégénération en passant à un prototype industriel surdimensionné, donc très coûteux, avec des incertitudes sur la sûreté. L'arrêt de Superphénix a condamné (provisoirement ?) la filière qui n'aurait pas dû dépasser le stade de la R&D.

Pour un développement durable

Il importe donc que la politique énergétique se fonde elle aussi sur l'idée de développement durable, en prenant le

temps et les précautions nécessaires. La volonté de limiter la part du nucléaire comme substitut aux énergies fossiles implique une politique sur le long terme (2050 et au-delà) avec des avancées technologiques dans le domaine du nucléaire comme dans celui des énergies renouvelables. Il apparaît financièrement et techniquement crédible de limiter la part du nucléaire à 50 % (au lieu de 75 %) en 2050, mais il faut mener de pair :

- Une politique de recherche et de prototype pour prolonger la vie des centrales existantes et définir de nouveaux modes de production, moins gourmands en combustibles et susceptibles de contribuer à l'élimination du plutonium,
- Une politique de développement des énergies durables, en R&D, mais aussi en termes industriels, avec des capacités d'exportation et sans doute un accompagnement technologique. Dans ce domaine, il s'agit de consolider nos compétences dans l'hydraulique, le solaire et l'éolien, mais aussi dans l'utilisation des courants et des marées. En outre, il faut jumeler l'effort d'économie d'énergie avec l'utilisation des énergies les

moins productrices de CO₂ : la biomasse et l'hydrogène, qui peuvent contribuer à l'avenir au stockage de l'énergie, afin de compenser l'intermittence du solaire ou de l'éolien. Enfin, on l'a souvent dit : l'énergie qu'on peut le mieux économiser est celle que l'on ne consomme pas ! Rien ne sera possible sans un effort considérable dans les deux secteurs les plus gourmands : le bâtiment et les transports.

Dans le domaine du bâtiment, l'ADEME⁹ envisage des efforts sur la base du scénario évoqué au départ, qui implique la division de gaz à effet de serre par un facteur 4. Le bâtiment est en effet le secteur le plus consommateur d'énergie : 44 % de l'énergie finale totale, 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'objectif fixé lors du Grenelle de l'environnement est d'atteindre 40 % d'économies d'énergie d'ici 2020. Il se décline en fonction du neuf (en 2020, des bâtiments à énergie positive), de l'existant (huit cent mille logements sociaux d'ici 2018,

9. ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

quatre cent mille réhabilitations par an d'ici 2020), des bâtiments publics (- 40 % d'énergie, - 50 % de GES). A noter cependant que le parc de bâtiments de 2050 est déjà construit aux deux tiers. Il peut y avoir déconstruction, mais elle sera limitée.

Les moyens pour atteindre l'objectif sont la recherche technologique, l'innovation, l'information, la mobilisation des professionnels. On peut faire porter l'effort à l'échelle du bâtiment, mais aussi à l'échelle de l'îlot, voire d'un nouveau quartier dans son ensemble. Bien sûr, il y a des contraintes :

- Décentralisation et intermittence des sources d'énergie, d'où la nécessité de réseaux « intelligents » et une maîtrise de la consommation pour une meilleure régulation, avec des « agrégateurs » pour la gestion centrale ou locale des réseaux et des services de stockage,
- Anticiper les nouveaux usages : recharge des véhicules électriques, intégration du solaire au bâti...

Des expériences de gestion locale sont menées en Provence-Alpes-Côte d'Azur sur mille cinq cents clients situés en zone sensible. D'autres expériences visent à optimiser l'énergie d'une zone économique avec production d'énergie renouvelable et stockage. On s'efforce aussi de maîtriser la demande des particuliers et d'accélérer l'insertion des énergies renouvelables dans les îles.

Autre secteur gourmand en énergie : les transports. S'agissant des véhicules routiers, les options technologiques concernent les véhicules thermiques, avec comme objectif de diviser par deux la consommation des véhicules neufs (allègement, architecture des moteurs, etc.), les véhicules hybrides (en partie rechargeables), les véhicules électriques : batteries, infrastructures de chargement, etc. Il s'agit de limiter les émanations de CO₂ en misant sur 70 % de véhicules électriques en service urbain et périurbain. L'objectif est une diminution par deux de la consommation totale. Dans tous les cas, il est intéressant de jouer sur le partage des véhicules : covoiturage ou véhicules mis à disposition.

Pour un « mix » énergétique

La notion de « mix » implique que l'on se refuse à privilégier une source d'énergie plutôt qu'une autre. Dans cette perspective, si l'on considère la stratégie développée par le CEA, on peut la résumer de la manière suivante : la France doit être une force de proposition en Europe et dans le monde pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ses engagements en ce sens sont pris au niveau international (accord de Copenhague fin 2009) ; au niveau européen (paquet énergie climat en 2008 : d'ici 2020, 20 % de gain en efficacité énergétique, 20 % de réduction des GES, 20 % d'énergies renouvelables pour l'Union européenne) ; au niveau français (plan climat, Grenelle de l'environnement : réduction des GES par facteur 4 d'ici 2050, 23 % d'énergies renouvelables en 2020).

Notre pays, pour 50 % de son énergie primaire, utilise des énergies fossiles – pétrole, charbon ou gaz –, fortement émettrices en GES. Les ressources étant vouées à s'épuiser sur la planète, les prix augmentent. Comme nous

devons importer ces produits, notre déficit commercial augmente. Les énergies fossiles avec le nucléaire forment l'énergie de base dont nous avons besoin. Impossible de descendre en dessous de trente gigawatts instantanés. On ne peut donc se passer de nucléaire si l'on veut éviter des conséquences négatives pour les particuliers et l'industrie. Il faut aussi agir sur les énergies renouvelables pour limiter l'appel aux énergies fossiles. C'est le mixage nécessaire entre nucléaire et énergies renouvelables dans la production d'électricité (avec un appoint de turbines à gaz) : pour un prix soutenable, une réduction des GES, une sécurité d'approvisionnement, une industrie performante. Le nucléaire fournit une électricité moins chère qu'en Allemagne, moins de CO₂ (quatre fois moins que la moyenne des pays de l'OCDE), permet de limiter l'importation d'énergies fossiles, suscite cent vingt-cinq mille emplois directs, deux cent quatre-vingt mille emplois indirects, et justifie l'existence de quatre cent cinquante entreprises spécialisées. Il y a synergie entre nucléaire et renouvelables, mais celles-ci ont leurs limites, notamment l'intermittence qui implique des progrès en matière

- de stockage, d'où les recherches effectuées par le CEA :
- Pour la sobriété et l'efficacité énergétiques dans les transports (véhicules électriques et hybrides) et l'habitat (le CEA souhaite avoir les moyens de doubler son effort en cinq ans),
 - Pour assurer le stockage indispensable (voir la biomasse par exemple),
 - Pour le développement des réseaux intelligents,
 - Pour de nouveaux modèles de production.

Ces recherches vont de pair avec celles qui concernent le nucléaire :

- Pour les réacteurs de quatrième génération qui utiliseront l'uranium pauvre produit en France (cinq cent mille tonnes) et le plutonium issu du retraitement du combustible usé : construction du prototype ASTRID¹⁰,
- Pour améliorer les réacteurs de deuxième et troisième générations,

10. ASTRID pour Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration. Il s'agit d'un projet français de prototype de réacteur rapide refroidi au sodium.

- Sur le cycle du combustible,
- Sur les questions de démantèlement et d'assainissement,
- Sur la fusion thermonucléaire (programme ITER¹¹), perspective à très long terme (2050 ?).

Le CEA développe également des recherches sur les effets des différents usages énergétiques sur l'homme, le climat et l'environnement. L'accident de Fukushima a mis en évidence des risques plus importants dans la construction comme dans la maintenance des centrales nucléaires : les nouvelles consignes d'EDF entraînent de nouvelles recherches liées à la sûreté.

Cette stratégie se veut cohérente dans la perspective d'un mix énergétique où s'équilibrent énergie nucléaire et énergies renouvelables. Le problème est que nous en sommes encore loin. Un certain volontarisme est nécessaire en matière de politique industrielle.

11. Lancé en 2005 le programme ITER réunit des scientifiques du monde entier autour d'un objectif commun : maîtriser l'énergie issue de la fusion de l'atome afin de répondre aux besoins énergétiques.

Une politique industrielle volontariste

Aujourd'hui, les énergies renouvelables dépendent des importations pour une part plus ou moins grande. Ainsi, pour l'éolien, la quasi-totalité des aérogénérateurs est importée, ce qui représente près de 75 % des coûts d'investissement. Le reste est fabriqué en France, notamment les composants (mâts, équipements électriques) dont une part est exportée. Pour l'éolien, on compte deux cent cinquante entreprises qui interviennent directement et cent cinquante entreprises sous-traitantes actives et susceptibles de se développer. Une politique de développement industriel en matière d'énergies renouvelables permettrait de limiter les importations et de développer l'emploi. Les estimations suivantes sont envisageables (en pourcentage du chiffre de nos importations de matériel) :

	2010	2030
Eolien	59 %	15 %
Solaire	36 %	15 %
Hydraulique	7 %	7 %
Bioénergie	22 %	15 %
Biogaz	40 %	15 %

De nouveaux métiers sont apparus dans le secteur de l'énergie et sont à la source de nombreux emplois. La formation qu'ils requièrent doit faire l'objet d'un programme de grande envergure.

Il importe aussi de faire des choix bien réfléchis dans le domaine du nucléaire. Il serait grave de renouveler l'expérience de Superphénix. On ne peut passer à des réacteurs de quatrième génération que dans la mesure où les prototypes ont pu être dûment vérifiés et expérimentés. L'exemple de l'EPR doit servir pour l'avenir. Les surcoûts ne sont pas liés uniquement à la sûreté : ils correspondent aussi aux conditions d'exploitation d'une centrale à haut (trop haut) rendement. A vouloir accélérer les processus, au nom de la concurrence internationale et de la nécessité d'exporter pour rentabiliser les investissements, on prend le risque de perdre sur tous les tableaux, celui de la consommation intérieure, celui de l'exportation et, bien sûr, celui de l'environnement.

Un contrôle démocratique

Il faut donc une politique à moyen et long terme, avec un suivi technologique et un contrôle permanent. Ce contrôle est une obligation pour l'Etat, mais il implique aussi l'opinion, donc les citoyens. On l'a vu, la question énergétique préoccupe fortement les Français. Ils peuvent comprendre qu'une transition en matière d'énergie demande du temps et des choix difficiles. Encore faut-il qu'ils aient en mains les données du problème. Trois conditions sont nécessaires. D'abord un vaste effort d'éducation de la jeunesse, à travers la formation initiale et continue. Ce sont les jeunes d'aujourd'hui qui constituent les futurs usagers et la future opinion. Il faut aller au-delà des cercles de la culture scientifique et technique. Une évolution des programmes, une formation des maîtres, une organisation qui rapproche le scolaire et le périscolaire sont nécessaires. Il y faudrait une véritable mission d'intérêt national sur une dizaine d'années. Ensuite un débat public avec des concertations locales et régionales, voire des consultations. Il doit prendre en

compte les aspects scientifiques, mais aussi les données humaines, sociales, géopolitiques. L'OPECST et le Comité économique, social et environnemental peuvent en être les maîtres d'œuvre. Enfin, serait nécessaire une veille permanente par un organisme qui réunirait d'une part des experts et des responsables des organisations concernées (institutions, syndicats), d'autre part des responsables d'associations et d'ONG engagées sur les questions énergétiques à un niveau national. Il n'y a rien de pire en effet qu'un débat sans lendemains, sauf à prévoir un nouveau « grand débat » cinq ans plus tard... Comme il existe un Comité d'éthique, il doit être possible à une autre échelle de réunir un comité permanent qui accompagnerait la transition énergétique.

CONCLUSION

Le débat sur l'impact des nouvelles technologies prend une signification particulière dans le domaine de l'énergie. En effet, le débat public est dominé par la question de « la sortie du nucléaire » qui est devenue le marqueur du combat écologique. On risque ainsi de négliger les données technologiques des diverses alternatives en focalisant l'attention sur les fins plutôt que sur les moyens. Or la France, en raison des choix déjà effectués, ne peut se passer d'un débat sur les moyens. Il revient aux politiques de l'organiser dans une perspective qui devra s'imposer progressivement à l'échelle planétaire : celle du développement durable. Les choix technologiques en matière d'énergie résultent pour l'essentiel de deux facteurs : la pression des besoins et les avancées de la science. C'est à ces deux niveaux que doit jouer l'action politique.

Dans le premier cas, il s'agit de maîtriser, d'organiser, de diversifier la consommation. Depuis les années 1980, les gouvernements ont mis en place un dispositif national

(de l'ANME¹² à l'ADEME) et soutenu l'effort des Régions, qu'il s'agisse de financer des aides aux particuliers ou de contribuer au développement de nouvelles technologies. Cela n'a pas suffi à promouvoir une véritable stratégie de réponse aux besoins des industries et des ménages. On en est loin pour le bâtiment où les expériences restent marginales ou insuffisamment exploitées (ainsi les améliorations significatives apportées dans la construction des établissements scolaires n'ont guère servi dans le parc HLM ou la rénovation des bâtiments administratifs). Il ne suffit pas de fixer des normes, il faut accompagner l'effort des entreprises et des ménages (un crédit d'impôt ne suffit pas) et engager une politique de formation et d'information de grande ampleur. En ce qui concerne les transports, un choix intéressant s'esquisse en faveur de la voiture électrique. Encore faut-il que le réseau d'entretien et de maintenance soit cohérent avec ce choix. On voit bien qu'il ne suffira pas de laisser faire le marché...

12. ANME : Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie.

Le second facteur concerne la recherche scientifique, et pas seulement technologique. Car au XXI^{ème} siècle, on ne peut pas découpler science et technologie. Les nouvelles technologies de production et de consommation de l'énergie suscitent des applications qui interrogent à leur tour la recherche proprement scientifique. L'énergie éolienne ou solaire pose des problèmes de stockage de l'électricité qui renvoient à une étude plus approfondie de la matière et des organismes qui peuvent servir de support : physique, chimie, biologie sont concernées, et il importe de soutenir les recherches en amont pour se donner une chance d'obtenir une réponse intéressante en aval. Il faut pouvoir concilier liberté de la recherche (source d'invention et de découverte) et programmes pluriannuels en facilitant les coopérations entre universités et grands organismes, recherche publique et recherche privée.

Le développement durable n'est pas seulement une affaire d'Etat. Il implique l'ensemble de la société. C'est pourquoi les nouvelles technologies doivent faciliter des modes de consommation économes et non polluants,

qu'il s'agisse du chauffage, du transport, de l'habitat et des divers usages de l'électricité. Celle-ci est gérée aujourd'hui à l'échelle nationale pour faciliter l'interconnexion et la régularité de la fourniture. On peut certainement améliorer la gestion des réseaux à ce niveau, mais il importe que l'utilisateur soit associé le plus directement possible à la gestion de sa propre consommation. Les énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien peuvent faciliter une gestion plus décentralisée, en relation avec l'évolution des structures démocratiques du territoire. Les collectivités territoriales jouent déjà un rôle important. Il doit être renforcé, en particulier pour les grandes villes où des expériences intéressantes sont d'ailleurs en cours, comme à Grenoble par exemple.

Le débat sur l'énergie doit être lui aussi durable : le nucléaire a trop habitué à transférer la responsabilité à l'Etat central. C'est aussi de cette habitude qu'il convient de sortir progressivement. L'avenir de l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de la société dépend, dans une démocratie, des citoyens qui en sont membres.

Remerciements

1^{ÈRE} PARTIE :

Alain Deshayes remercie tous les membres de la section « Sciences et Technologies » du CESC : Pierre-Marie Dugas, Guy Fayolle, Gabriel Ruget et Michel Lostis, pour leurs contributions à la rédaction de ce texte, ainsi que Robert Chapuis, Eliane Drut et Jean-Charles Schmitt pour leurs contributions aux réflexions de la section S&T.

Merci également à toutes celles et tous ceux qui ont participé aux séminaires sur la biologie de synthèse et sur les nanotechnologies, conjointement organisés par le CESC et la Fondation Jean-Jaurès en février 2012 : Geneviève Fioraso, députée de l'Isère, membre de l'OPECST, Alfonso Jamarillo, CNRS-Ecole Polytechnique, François Képes, Institut des systèmes et de la biologie synthétique à Evry, Eric Quéméneur, adjoint au directeur des technologies du vivant, CEA, David Sourdive, vice-président et cofondateur de la société Collectis, et Françoise Russo-Marie, INSERM ; ainsi que Michel Destot, député-maire de Grenoble, Yves Samson, directeur du programme Nanosciences, CEA, Jean-Yves Bottero, CEREGE (Aix-en-Provence), et Nayla Farouki, philosophe, CEA.

2^{ÈME} PARTIE :

Ce texte résulte largement des apports de chercheurs et responsables institutionnels réunis lors d'un séminaire organisé par le CESC du Parti socialiste et la Fondation Jean-Jaurès le 31 janvier 2012. Nous remercions en particulier Bernard Bigot, administrateur général du CEA, Jean-Paul Bouttes, directeur de la stratégie d'EDF, Patrick Criqui, directeur du Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPII) à l'Université PMF de Grenoble, Daniel Clément, directeur scientifique de l'ADEME, Marc Fontecave, professeur au Collège de France, membre de l'Académie des Sciences, Daniel Lincot, directeur de l'Institut RD sur l'énergie photovoltaïque au CNRS.

Le débat était animé par Robert Chapuis, ancien ministre, en présence des responsables concernés de l'équipe de campagne de François Hollande : Marie-Hélène Aubert, ancienne députée européenne, et François Brottes, député de l'Isère.

Merci aussi à Pierre Papon, ancien directeur du CNRS, qui a bien voulu relire ce texte.

COLLECTION DIRIGEE PAR GILLES FINCHELSTEIN
ET LAURENT COHEN

ISBN : 978-2-36244-057-1

© EDITIONS FONDATION JEAN-JAURES
12 CITÉ MALESHERBES - 75009 PARIS
www.jean-jaures.org

Réalisation : REFLETSGRAPHICS
Achevé d'imprimer par l'imprimerie PANOPLY

JUILLET 2013

Robert Chapuis
Alain Deshayes

Nouvelles technologies : clé de notre avenir ou cause de notre perte ?

Trop souvent, les responsables politiques ne prêtent attention aux questions scientifiques et technologiques que lorsqu'elles suscitent des controverses dans leurs applications.

Fruit d'une réflexion menée conjointement avec le Comité économique, social et culturel du Parti socialiste, cet Essai montre pourtant la nécessité d'anticiper les conséquences sociales, économiques et écologiques des technologies émergentes. C'est à cette condition qu'il sera possible d'en réguler le développement selon les objectifs d'un projet de société démocratiquement élaboré.

www.jean-jaures.org



9 782362 440571

ISBN : 978-2-36244-057-1

6 €