

## Annexe à la note Prospective 2050-2070 – un autre scénario

### La construction d'un autre scénario

#### Des faits et des situations qui dureront assurément

La programmation d'un système électrique ne peut se faire qu'à très long terme. Une durée de cinquante ans est un minimum. La démarche prospective doit donc s'appuyer sur des faits dont il est sûr qu'ils dureront sur cette période.

Les constatations les plus élémentaires et les plus durables passent parfois inaperçues. Il est utile de les rappeler.

#### Consommation d'énergie, production et consommation d'énergie fossile, émissions de CO2

La consommation d'énergie est nécessaire à la vie. Les pays en développement prévoient de rapprocher leur consommation de celle des pays industrialisés. Celle-ci peut diminuer du fait d'économies d'énergie moins coûteuses que la consommation évitée. Comme l'efficacité « marginale » est décroissante, les possibilités d'économie d'énergie deviennent rapidement de plus en plus chères. En sens inverse le progrès technique permet de produire et d'utiliser des formes d'énergie de plus en plus « pointues » (à très faible entropie) qui sont produites avec de très grosses quantités d'énergie ordinaire (à forte entropie comme la chaleur) ; par exemple la production de rayons lasers qui servent à graver les microprocesseurs de nos appareils toujours plus miniaturisés. *Le progrès technique ne cessera donc d'augmenter les possibilités d'utilisation de l'énergie.*

#### La production d'énergie fossile

La production de pétrole, de gaz et de charbon deviendra de plus en plus coûteuse. La consommation cessera d'augmenter puis diminuera lorsque son coût deviendra égal à celui des économies d'énergie ou à celui d'autres sources d'énergie, éolien, solaire, nucléaire, hydraulique, géothermie ou biomasse.

Cette limite ne sera pas atteinte si une autre limite est fixée *et respectée* pour éviter des changements climatiques aux effets dramatiques.

C'est pourquoi l'objectif d'une politique de l'énergie ne doit pas être de limiter la consommation d'énergie mais de limiter la consommation de pétrole, de gaz et de charbon. Se donner comme objectif de limiter la consommation d'énergie est un contresens. Ce contresens va à l'encontre de la lutte contre les émissions lorsqu'il conduit à consacrer à cet objectif fallacieux des ressources financières qui pourraient servir à diminuer la consommation d'énergie fossile.

#### L'action des Etats : les moyens dont ils disposent

Pour respecter cette autre limite, l'action des Etats nationaux est nécessaire. Ils disposent de plusieurs moyens : la réglementation, la fiscalité qui rend plus coûteuses les énergies émettrices de CO2 ou les aides financières pour rendre moins coûteuses les économies d'énergie ou l'utilisation de formes d'énergie qui n'émettent pas de CO2.

#### Les relations entre Etats

Les décisions politiques sont nationales et le CO2 ignore les frontières.

Les coopérations seront toujours difficiles. Mais elles sont toujours souhaitables de façon à mener les actions là où elles sont le plus efficaces, c'est-à-dire là où le coût de la tonne de CO2 évitée est le plus bas.

La confrontation entre puissances mondiales est un fait durable dont on pouvait avoir perdu conscience après la chute du mur de Berlin, l'affaiblissement et la disparition de l'URSS et avant la montée en puissance de la Chine, l'affirmation de la Russie, le changement d'expression des Etats-Unis et l'apparition d'autres puissances régionales.

L'Union européenne se rend compte de sa dépendance. Cela aura des effets durables mais on ne sait pas lesquels puisqu'aujourd'hui ses Etats-membres n'ont pas les mêmes perspectives stratégiques : relations

avec les Etats-Unis, avec la Russie, affirmation plus ou moins volontaire d'une force militaire ; intervention dans les pays du Sud, etc.

La coopération entre la France et les pays d'Afrique est une nécessité stratégique qui, en même temps, sera source d'efficacité. Elle ne sera possible qu'avec des modalités nouvelles qui manifestent l'équilibre des relations.

### **Les ressources disponibles**

L'énergie éolienne est très abondante ; l'énergie solaire est pour ainsi dire intarissable. Mais le vent est variable ; il peut être prévu mais ne peut pas être maîtrisé. L'énergie fournie par le soleil sous nos latitudes est quatre à cinq fois plus importante en été qu'en hiver, sous oublier évidemment l'alternance jour-nuit.

La France est très peu dotée en matériaux dont ont besoin aujourd'hui les éoliennes et les batteries, ce qui la rend dépendante d'autres pays, notamment la Chine. Il n'est pas exclu *a priori* que des découvertes techniques permettent de ne plus en avoir besoin, mais personne ne peut l'affirmer.

Les éoliennes et le photovoltaïque affectent d'une façon ou de l'autre des surfaces plusieurs centaines de fois plus importantes que le nucléaire. Celui-ci respecte donc beaucoup mieux la biodiversité.

Les seules matières dont le nucléaire a besoin et que l'on ne trouve pas sur le territoire national sont les matières premières radioactives. La technique de la quatrième génération permettra d'utiliser l'uranium appauvri issu de l'enrichissement de l'uranium naturel. Les quantités disponibles répondront aux besoins de plusieurs siècles de consommation française d'électricité.

### **Les déchets nucléaires et le risque d'accident grave**

Les déchets nucléaires enfouis dans le sol sont durablement radioactifs. Ils sont séparés de la biosphère par plusieurs barrières : leurs emballages qui, dans un lointain futur, ne seront plus étanches, et la couche d'argile où ils sont stockés. L'argile est imperméable et les produits stockés sont insolubles. Comme rien n'est totalement imperméable et que rien n'est totalement insoluble, la radioactivité pourra migrer, mais tellement lentement que lorsqu'elle rejoindra la biosphère elle aura presque disparu et sera très inférieure à la radioactivité naturelle en surface du lieu de stockage. Pour l'avenir, des techniques pour transformer les déchets en matière dont la radioactivité disparaît en quelques décennies sont aujourd'hui connues.

Les réacteurs nucléaires sont le siège d'une formidable quantité d'énergie. En cas de grosses perturbation mettant en défaut la circulation de l'eau qui évacue cette énergie sous forme de chaleur, l'eau se dilatera. En conséquence les neutrons émis par la réaction nucléaire, qui traversent l'eau où ils sont ralentis et reviennent sur la matière radioactive pour y susciter une nouvelle réaction seront moins ralentis et, par le fait même, ne pourront plus déclencher une nouvelle réaction. Celle-ci s'étouffe presque instantanément. Les matières produites par la réaction, elles, continuent d'émettre de la chaleur et c'est cette chaleur qu'il faut évacuer. A défaut, la cuve où se réalise la réaction se perce, des matières tombent sur le radier. La pression est telle dans la cuve qu'il faut laisser s'échapper des gaz ; puis la pression dans l'enceinte de confinement oblige également à laisser passer des gaz. En France, des événements dans l'enceinte de confinement sont munis de filtres qui arrêtent les particules liquides ou solides portant des matières radioactives et des « recombineurs d'hydrogène » évitent une explosion d'hydrogène. Les réacteurs japonais accidentés à Fukushima n'avaient pas de filtres ni de recombineurs d'hydrogène. Après cet accident, l'alimentation de secours en électricité et en eau de tous les réacteurs français a été renforcée et une équipe de secours volante fortement équipée et autonome peut se rendre sur les lieux bien avant que la situation s'aggrave. Car il se passe quelques jours entre l'origine de l'accident et ses conséquences hors de l'enceinte de l'usine, ce qui laisse le temps de réagir. C'est ainsi qu'à Fukushima le nombre de décès dans la population pouvant être imputés à la radioactivité émise est nul. Il y en aura peut-être quelques centaines sur des millions de personnes en cinquante ans ; ce seront des décès que l'on ne pourra pas attribuer à la radioactivité due à l'accident. Ils seront extrêmement peu nombreux. Les dommages causés par l'accident sont d'une autre nature : l'obligation d'abandonner de grandes étendues le temps qu'elles soient décontaminées ou que la contamination ait suffisamment décru naturellement.

On ne veut pas le voir, mais la politique publique est *obligée* de donner un prix à la vie humaine pour prioriser les actions pouvant éviter des accidents mortels. Cela pose des questions éthiques. Mais dans le cas du nucléaire, ces questions ne se posent pas car le très grave accident cause très peu de morts. Comme les dégâts qu'il cause ne sont pas irrémédiables, il est possible de calculer leur coût. Plusieurs études s'y

sont attelées. Les plus lourdes estimations que j'aie trouvées se chiffrent en quelques centaines de milliards d'euros. La probabilité d'occurrence d'un accident est l'objet de débats. Un accident comme celui de Tchernobyl ne peut pas se produire en France puisque la technique des réacteurs n'est pas la même. L'accident de Fukushima n'aurait pas eu le même impact puisque les réacteurs accidentés n'étaient pas équipés des recombineurs d'hydrogène conçus pour éviter les explosions d'hydrogène ni de filtres à sable conçus pour arrêter les aérosols porteurs de radioactivité. Néanmoins, on ne peut pas exclure complètement la possibilité d'un très grave accident en France. Les spécialistes estiment que, pour les réacteurs existants et après les mesures de précaution complémentaires décidées à la suite de l'accident de Fukushima, la probabilité d'un très grave accident est de un millionième par réacteur et par an. En « espérance mathématique » (une expression de statisticiens assez peu appropriée en la matière...), le coût du risque serait donc de 30 millions d'euros par an, pour une production supérieure à 300 millions de MWh, soit 0,1 € par MWh.

Encore une fois, ce calcul ne soulève pas de difficulté éthique car l'accident nucléaire très grave ne cause pas de dommages irrémediables.

Si jamais il était décidé, pour supprimer le risque de renoncer complètement au nucléaire, cela, indirectement, générerait d'autres dommages. Le plus probable serait que la population refuse les dizaines de milliers d'éoliennes nécessaires pour répondre aux besoins, ou ne puisse pas financer les dépenses d'économie d'énergie qui permettent d'en limiter le nombre ou que, face à ces dépenses ou au manque d'électricité, le pouvoir politique soit contraint de relancer massivement la production d'électricité à partir de gaz ou de charbon.

### **Les fluctuations de la consommation et de la production éolienne et photovoltaïque**

La consommation française d'électricité connaît des fluctuations à l'échelle journalière, hebdomadaire et saisonnière. Grâce à la flexibilité de la production nucléaire, le système électrique peut répondre à la demande à toute heure avec une très faible production à partir de gaz et sans même utiliser complètement les capacités de stockage et de déstockage offertes par les Steps et par les lacs de montagne. Le remplacement de nucléaire par des éoliennes et du photovoltaïque qui augmenteront les besoins de flexibilité obligera à augmenter les capacités de stockage. Il arrivera que la puissance demandée aux moyens pilotables dépasse 50 GW. Les moyens pilotables permettant de répondre à tout instant à la demande sont la production à partir de gaz, les stockages et l'importation.

La relation entre la quantité d'électricité pouvant être contenue dans un stockage (exprimée en gigawattheures, GWh) et la puissance en gigawatts, GW, que ce stockage peut délivrer pendant tout le temps où l'on en a besoin du fait d'un manque de vent ou d'une forte demande, est généralement mal connue.

Pour décaler le moment où l'électricité est consommée de celui où elle est produite, les batteries apportent une contribution mais celle-ci est très insuffisante car les batteries se déchargent. De plus, comme elles coûtent cher, elles ne sont intéressantes que si elles sont fréquemment sollicitées. Pour un stockage de longue durée, la seule autre méthode envisageable dans les décennies à venir est de produire ou bien de la chaleur qui peut être stockée ou bien un gaz ou un liquide qui peut également être stocké puis utilisé pour produire ou pour remplacer de l'électricité. Cela passe par la production d'hydrogène.

Celui-ci peut être directement introduit dans les conduites de gaz, dans une certaine limite ; il peut être stocké et alimenter des piles à hydrogène ; il peut servir à la production de méthane de synthèse qui, lui-même sera utilisé comme l'est aujourd'hui le gaz naturel, y compris pour produire de l'électricité – on parle de procédé P2P2G - et l'on peut y voir là un moyen de « stockage intersaisonnier ».

Le coût des batteries va continuer de diminuer. Le rendement du procédé P2P2G sera toujours inférieur à 30 %.

La consommation peut s'adapter dans une certaine mesure aux possibilités de fourniture par le système électrique. Elle peut anticiper une consommation avec les ballons de chauffe-eau par exemple. Elle peut la retarder en coupant le chauffage quelques minutes. La recharge des batteries de véhicules peut s'adapter aux possibilités du réseau électrique.

Une partie de la consommation peut s'effacer définitivement lorsqu'elle est remplacée par une autre forme d'énergie. Il en sera ainsi avec les véhicules hybrides et le chauffage hybride.

Le coût de production à partir d'éoliennes et de photovoltaïque continuera de diminuer.

### **La biomasse et l'hydraulique**

Il vaut mieux éviter d'utiliser la biomasse pour produire de l'électricité si celle-ci a d'autres usages où elle est mieux valorisée.

De même les possibilités de production hydraulique sont déjà largement employées.

C'est dans ce cadre assez bien défini que peut s'élaborer une prospective

### **Les « degrés de liberté » d'une réflexion prospective**

**L'échéance** : la loi sur la transition énergétique fixe comme échéance l'année 2050, c'est-à-dire dans 30 ans. Vu la durée de construction d'une centrale nucléaire et le délai nécessaire pour bâtir un potentiel de production et d'installation de réacteurs nucléaires, il est préférable de retenir une échéance plus lointaine, ici 2070.

**La détermination de l'objectif.** Il y a une grande diversité d'objectifs possibles ; voici quelques exemples

Répondre à la demande d'électricité en dépensant le moins possible et avec une émission de CO2 inférieure à une certaine limite

Si les émissions de CO2 ne sont pas nulles, les compenser par un « coût du CO2 » ou participer au financement d'actions qui seront menées dans d'autres pays de façon plus efficace qu'en France. Par exemple, financer du photovoltaïque en Afrique plutôt qu'en France métropolitaine.

Être autonome ou prévoir qu'il sera toujours possible d'importer en cas de besoin ; dans quelle limite.

Dessiner le parc de production et de stockage pour répondre au plus juste à la demande d'électricité et utiliser les excédents à autre chose (exportation ou production d'hydrogène ou de chaleur) ou le surdimensionner pour augmenter les excédents pour d'autres usages – ce qui peut être plus efficace que de créer une possibilité de production spécifique pour ces autres usages.

Nous avons pris le parti suivant : la neutralité carbone est recherchée pour 2070 ; en 2050 et au-delà, si une partie la production d'électricité est faite avec du gaz fossile, les émissions sont compensées par des investissements en Afrique qui évitent des émissions égales ; les hypothèses de consommation sont choisies de sorte que le coût de l'économie d'électricité ne soit pas supérieur au coût de production d'électricité ; la durée de vie moyenne des réacteurs nucléaires existants est 65 ans ; le potentiel de l'industrie nucléaire augmente progressivement jusqu'à pouvoir livrer 2 EPR par an – ou 3 GW