Quelles énergies pour le XXI^{ème} siècle : en Auvergne ? en France ?

Débat sous la forme d'une « conférence citoyenne » organisé par la section locale Auvergne de la SFP en partenariat avec la Maison de l'innovation et la Bibliothèque municipale et interuniversitaire

Clermont-Ferrand, 2000

Société Française de Physique
Siège social et administration
33, rue Croulebarbe
75013 Paris - Tél. : 01.44.08.67.10
sfp@sfpnet.org

Reconnue d'utilité publique
par décret du 15 janvier 1881
Membre de la Société européenne
de physique

Supplément au *Bulletin de la SFP* n° 134

SOMMAIRE

Les conférences citoyennes - considérations générales	3
Les différentes sources d'électricité	6
Impacts environnementaux	9
Conclusions	12
Annexe : fiches énergies	16
Glossaire	20

bulletin de la société française de physique

Supp. 134 5/02

Auvergne :

l'énergie au menu d'une conférence citoyenne

Comité d'organisation

Jean-François Mathiot
Société française de physique, section Auvergne, et Laboratoire de physique corpusculaire, CNRS/Université Blaise-Pascal

Nicolas Arnaud
Laboratoire magmas et volcans, CNRS/ Université Blaise-Pascal

François Cavalier
Bibliothèque municipale et interuniversitaire

Danielle Hugon
Maison de l'Innovation, CCSTI du Conseil général du Puy-de-Dôme

Vincent Verney
Laboratoire de photochimie moléculaire et macromoléculaire, CNRS/Université Blaise-Pascal

Secrétariat

Catherine Pinty
Laboratoire de physique corpusculaire, CNRS/Université Blaise-Pascal.
Tél: 04 73 40 51 25 , Fax: 04 73 26 45 98
Mèl : SFP.auvergne@univ-bpclermont.fr, http://sfp.in2p3.fr/Auvergne

Communication

Cécile Nore
Maison de l'innovation, CCSTI du Conseil général du Puy-de-Dôme
Tél : 04 73 98 15 80, Fax: 04 73 98 15 89
Mél : cecile.nore@cg63.fr

Remerciements

ADEME Auvergne, Bibliothèque municipale et interuniversitaire, Conseil général du Puy-de-Dôme, Laboratoire de physique corpusculaire, (CNRS/IN2P3), Mairie de Clermont-Ferrand, Maison de l'innovation, Société française de physique.

Les scientifiques de tous horizons, physiciens, chimistes, physiciens de la terre et de l'atmosphère, économistes... ont un devoir – sinon une obligation – d'information et d'éducation d'un public le plus large possible. C'est ainsi que le conçoit la Société française de physique, à l'origine de cette initiative.

Tout, ou presque, a déjà été dit dans des congrès, colloques, séminaires, débats publics... sur les différentes sources d'énergie. Pourtant, toutes ces réflexions sont souvent perçues comme trop générales, trop théoriques, ou encore réservées à un groupe restreint d'« initiés ». Elles sont parfois même « pilotées » par de grands groupes industriels directement impliqués par la production d'énergie sous une forme ou sous une autre. Elles ne permettent pas d'arriver à une analyse à la fois collective et objective des problèmes soulevés par ce sujet pour le moins important pour l'avenir de notre société.

Les conférences citoyennes constituent un moyen de replacer les citoyens au centre des enjeux et des choix à effectuer face aux défis qui se posent à nos sociétés modernes. Elles représentent une manière nouvelle et originale de concevoir le débat démocratique, entre experts et citoyens, à partir d'une évaluation scientifique, économique, sociale et politique des questions qui peuvent émerger dans le domaine choisi.

Ces conférences se déroulent typiquement en quatre étapes :

• La première, de préparation, consiste à composer deux panels : l'un d'experts, l'autre de citoyens. Le panel des citoyens est formé de dix à quinze personnes environ, d'âge, de formation et de métier très divers. Quant au panel des experts, il rassemble une quinzaine de spécialistes des différents domaines abordés lors de la conférence.

• La deuxième phase s'articule autour de plusieurs séances de formation. À chacune de ces séances, un ou deux experts sont invités à présenter un aspect particulier du problème posé : ce que l'on sait, les perspectives à court, moyen et long terme, et surtout les incertitudes actuelles, que ce soit dans le domaine scientifique et technique, ou économique et politique.

• La troisième étape, publique, met en présence pour un débat contradictoire, le panel des citoyens, celui des experts et le grand public.

• Enfin le quatrième épisode prend la forme d'un mémoire de propositions de la part du panel des citoyens. Ce document est destiné, simplement, à faire entendre une voix citoyenne dans un débat de fond trop souvent confiné, voire à éclairer les responsables territoriaux dans leurs choix politiques.

Cette conférence citoyenne est la première expérience de ce type en Auvergne, après celle organisée au niveau national en juin 1998 sur le thème des organismes génétiquement modifiés. Cette forme de débat est extraordinairement riche. Elle peut s'adapter à des sujets très variés, et surtout à tous les niveaux d'organisation d'une société moderne et démocratique, du village à la nation elle-même. C'est d'ailleurs à l'échelon local : département, groupement de communes ou commune elle-même que cette forme de débat nous paraît la plus fructueuse et prometteuse.

Jean-François Mathiot

Président de la section locale Auvergne

Considérations générales

Le problème posé par l'exploitation et l'utilisation de plus en plus grande des sources d'énergie est évidemment un problème que l'on doit envisager à l'échelle planétaire. Les réserves d'énergie fossile (charbon, gaz, pétrole, uranium...) sont réparties sur tout le globe, et un pays comme la France, par exemple, ne pourrait subvenir intégralement à ses besoins dans ce domaine.

Dans les années à venir, la très forte demande énergétique des pays en voie de développement devra être satisfaite aussi, en utilisant au mieux l'expérience acquise et la technologie développée ces dernières dizaines d'années dans les pays dits développés.

Enfin, l'équilibre écologique mondial nécessite une prise de conscience planétaire des problèmes liés, par exemple, à l'émission des gaz à effet de serre dans les différents processus de production et de consommation d'énergie.

Pourquoi alors discuter de ces questions en France, et plus précisément en Auvergne ? Il nous paraît essentiel que la prise de conscience de ces problèmes intervienne à tous les niveaux de la société civile. Au-delà des scénarios, certes indispensables, d'évolution de la demande énergétique mondiale et française, dans les vingt années à venir, il est probable que les solutions aux problèmes posés ne puissent se trouver qu'à un niveau régional. De plus, les orientations nationales dans ce domaine doivent (ou devraient) reposer sur un consensus le plus large possible.

La section locale Auvergne de la Société française de physique a choisi, en partenariat avec la Maison de l'innovation (CCSTI du Conseil général du Puy-de-Dôme), et la Bibliothèque municipale et interuniversitaire, d'aborder ce sujet dans le cadre d'une conférence citoyenne (voir avant-propos).

Le programme des séances de formation a été articulé autour de quatre grands thèmes :

- La production centralisée d'électricité. Celle-ci repose essentiellement en France sur les centrales nucléaires. Ce thème a été traité en détail.
- La production d'électricité décentralisée et intermittente. L'utilisation actuelle de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne et de l'énergie hydraulique a été étudiée, en mettant en valeur leurs avantages, et les différentes contraintes de leur mise en œuvre.
- Les sources d'énergie alternatives. Nous avons abordé les sujets suivants : la filière bois-énergie, les piles à combustible, la géothermie, la fusion nucléaire.
- Les aspects économiques et géopolitiques liés à la production et à l'utilisation de ces différentes sources. Nous avons en particulier étudié les programmes d'économie d'énergie.

Ces sept séances de formation ont été complétées par trois séances de travail rassemblant le panel des citoyens et le comité d'organisation.

Ce document constitue une mise en forme des différents éléments de réflexion dont a pu bénéficier le panel des citoyens. Il n'a pas vocation à être exhaustif. Il ne peut non plus constituer un rapport sur la question de la production et de la consommation d'électricité en France. Il a simplement pour but d'éclairer d'une manière nouvelle ce sujet, en s'appuyant sur la réflexion du panel des citoyens.

Nous ne discuterons pas ici des perspectives offertes par la fusion nucléaire, car elles sont à trop long terme (après 2050 si ce n'est pour la fin du siècle).

Un certain nombre de notions plus techniques, mais qu'il est utile de connaître, sont expliquées dans un glossaire. Ce glossaire peut être lu indépendamment. Nous avons aussi rassemblé en annexe un certain nombre de données techniques relatives à chaque source d'énergie, sous forme de « fiches énergies ».

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les membres du panel des experts qui n'ont pas ménagé leur peine lors des séances de formation. Ils pourront retrouver, au fil de ce document, certains de leurs propos.

La question posée : « Quelles énergies pour le XXI^{ème} siècle ? » est naturelle dans la mesure où dans les 20 prochaines années, la consommation d'énergie dans le monde sera égale à celle qui a été faite jusqu'à présent.

Les interrogations exprimées dans ce domaine ont évolué avec le temps. Il y a 30 ans, la préoccupation centrale était celle de la pénurie probable des sources d'énergie (choc pétrolier de 1973, discussion sur la croissance 0). S'en sont suivies les premières mesures d'économies d'énergie. A cette question se raccrochait la volonté politique de réduire la dépendance de la France dans son approvisionnement énergétique, d'où le développement de la filière nucléaire en France. Actuellement, le problème central est plutôt celui de savoir quel type d'approvisionnement en énergie il convient de développer, et pour quel usage, afin de préserver l'environnement. Dans ce cadre, le sujet du réchauffement de la planète, ou celui de la gestion des déchets de la filière nucléaire, sont évidemment majeurs. L'enjeu environnemental arrive d'ailleurs au centre de toutes les préoccupations : avant, nous concevions le progrès malgré l'environnement. Aujourd'hui nous le concevons avec et même en fonction de l'environnement.

Comment aborder le sujet

La réflexion engagée lors de cette conférence citoyenne s'est, dès le départ, placée dans un contexte régional d'aménagement du territoire. Elle n'a bien sûr pas vocation à concurrencer les innombrables scénarii sur l'évolution de la production et de la consommation d'énergie dans le monde, mais plutôt d'aborder le sujet d'un point de vue plus pragmatique, mais peut-être aussi plus significatif pour le citoyen.

La majorité des statistiques indiquées sont tirées de l'ouvrage : « Les chiffres clefs-l'énergie 1998 » publié par l'Observatoire de l'énergie du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Afin de se concentrer sur les grandes tendances, et les ordres de grandeur, toutes les statistiques ont été arrondies, parfois largement, en tenant compte de l'évolution au cours des dernières années. Les ouvrages suivant ont également été utilisés :

Quid 2000

« L'énergie dans le monde : bilan et perspectives », J.-J. Bobin, H. Nifenecker, C. Stephan, EDP Sciences

« Électronucléaire : une présentation par des physiciens », publication du Cercle d'études sur l'énergie nucléaire

« Radioactivité », plaquette éditée à l'occasion du centenaire de la découverte de la radioactivité.

« Énergie, un défi planétaire », B. Dessus, Ed. Belin

« L'énergie dans les régions », chiffres clés 1998, Observatoire de l'énergie, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

Tableaux de l'économie française 1999-2000, INSEE

« Énergie 2010-2020 », rapport du Commissariat général du plan

Les cahiers de Global Chance, directeur de la publication : B. Dessus

Revue de l'énergie, n°509, septembre 1999

« L'énergie », Jean-Louis Bobin, collection Dominos, ed. Flammarion

Cette réflexion s'est articulée autour de trois questions très simples :
- Pour qui ?
- Pourquoi ?
- Combien (en quantité et en coût) ?

Il est clair en effet que la question du meilleur coût d'approvisionnement en énergie ne peut pas se poser a priori. Il dépend de l'utilisation qui est faite de cette énergie, et de qui en est le consommateur. On peut s'en persuader facilement en regardant la consommation exorbitante de piles électriques (plusieurs dizaines de millions par an), malgré le prix particulièrement élevé de l'électricité produite, supérieure à 300 € (environ 2 000 F) le kWh ! Ici le service rendu à l'utilisateur prime sur la rentabilité immédiate exprimée en euros par kWh, dans la mesure où les sommes mises en jeu pour chaque usage (quelques dizaines de centimes d'euros) sont estimées faibles par le consommateur.

Afin de bien comprendre les contraintes actuelles pour utiliser l'énergie de la façon la plus rationnelle possible, il est nécessaire d'envisager au moins quatre niveaux d'utilisateurs différents :
- une agglomération de 1 000 000 hbts
- une agglomération de 250 000 hbts
- une unité de 1 000 hbts
- un foyer isolé

Il est relativement facile de concevoir les besoins d'un foyer isolé, et plusieurs solutions sont actuellement disponibles, et utilisées (comme nous le verrons plus loin) selon le lieu d'habitation. A l'autre extrême, les solutions pour une agglomération d'un million d'habitants passent par une production centralisée d'électricité.

Les contraintes posées par les deux derniers types d'habitation sont par contre plus difficiles à cerner. Elles concernent l'habitat type en Auvergne. Pour cela nous avons imaginé deux types d'unité d'habitation :
- l'Unité d'habitation rurale (UHR) : ce type d'unité d'habitation est un bourg de 1 000 habitants, sans grosse unité industrielle. Il correspond, par exemple, au bourg de Rochefort-Montagne dans le Puy-de-Dôme.
- l'Unité d'habitation urbaine (UHU) : ce type d'unité d'habitation est une agglomération de 250 000 habitants. Il correspond, par exemple, à l'agglomération de Clermont-Ferrand.

Ces deux unités nous donneront, tout au long de ce document, une représentation moins abstraite des différentes caractéristiques de la production et de la consommation d'électricité en France. Nous emploierons à ce propos les sigles UHR et UHU. De même, au niveau de l'unité de production d'électricité, nous parlerons de Réacteur nucléaire standard équivalent (de sigle RNSE). Celui-ci correspond à la production d'électricité d'un réacteur nucléaire fictif de 1 000 MW fonctionnant pendant un an avec une disponibilité de 80 %. Cette puissance correspond environ à la puissance moyenne des réacteurs nucléaires actuellement en fonctionnement en France. Cette unité pourra s'appliquer à toute les sources d'énergie, même si elles ne sont pas d'origine nucléaire.

Enfin, en ce qui concerne le prix de revient de l'électricité, nous prendrons comme unité de mesure le prix payé par un particulier, sans tarif préférentiel, c'est à dire environ 10 centimes d'euros par kWh (ou 65 c/kWh). Nous l'appellerons prix public/kWh.

Toutes ces unités nous permettront de nous affranchir d'un discours trop technocratique – qui retient le prix, ou la consommation, au dixième si ce n'est au centième près – tout en donnant une idée très concrète du prix à payer.

La situation en Auvergne

Cette situation peut se résumer en trois caractéristiques :

• La consommation moyenne d'électricité est identique à la moyenne nationale.

• La production moyenne d'électricité hydraulique, par habitant, est similaire à la production nationale. En revanche, il n'existe pas d'autre source de production d'électricité. Pour être autonome, la région Auvergne a donc besoin de trouver à l'extérieur environ 80 % de sa consommation d'électricité.

• La densité de population est deux fois plus faible que la moyenne nationale. Cela se traduit immédiatement par un nombre de lignes électriques deux fois plus grand que la moyenne nationale, essentiellement pour acheminer l'électricité dans les espaces ruraux de la région.

Structure de la production et consommation d'énergie

Les différentes sources d'approvisionnement en énergie sont traditionnellement rangées en quatre catégories :
- charbon
- gaz
- pétrole
- électricité primaire (production directe d'électricité – centrales nucléaires, centrales hydrauliques, panneaux solaires et éoliennes)

Nous avons indiqué sur la figure 1 la répartition de la consommation brute d'énergie selon ces quatre catégories. La majorité de cette consommation correspond à l'électricité primaire, suivie de près par le pétrole. La production d'électricité à partir de centrales thermiques classiques (charbon, gaz ou pétrole) est marginale à l'heure actuelle. Elle est de l'ordre de 10 Mtep. Notons enfin qu'environ 10 % de la consommation d'énergie est utilisée pour la consommation interne de la branche énergie, c'est-à-dire essentiellement pour l'extraction et le pompage de la matière première elle-même.

Ces statistiques correspondent à la consommation actuelle, et ne préjugent en rien de son évolution. Il est intéressant de noter qu'en 1970 il était prédit un doublement de la demande énergétique en France tous les 10 ans. Elle n'a augmenté en fait que de 35 % en 25 ans, soit une augmentation annuelle moyenne de 1,2 %. Ces cinq dernières années, elle a été de 1,6 %.

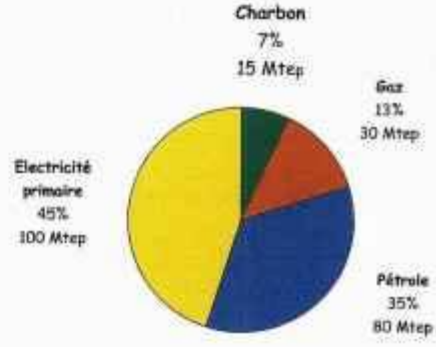


Figure 1 : Consommation brute d'énergie.

Secteurs d'activité

Cette consommation brute d'énergie se répartit ensuite en trois grands secteurs d'activité :
- les transports
- le secteur industriel
- le secteur résidentiel et tertiaire

Cette répartition est indiquée sur la figure 2. La consommation des transports et du secteur résidentiel et tertiaire est en augmentation ces dernières années, celui du secteur industriel en diminution.

La plus grande partie de la consommation de pétrole se retrouve dans les transports, le reste dans le secteur industriel. Ce dernier secteur consomme aussi la majeur partie de la production de charbon et de gaz. La consommation du secteur résidentiel et tertiaire se fait essentiellement sous forme électrique, avec aussi une partie non négligeable de pétrole (fuel domestique pour le chauffage et la production d'eau chaude).

Il est intéressant de noter que la grande majorité de la consommation est réalisée dans le secteur résidentiel et tertiaire. Le reste se répartit a peu près à égalité entre secteur industriel et transports. Le choix de se restreindre, pour cette conférence citoyenne, à la production et consommation d'électri-

Figure 2 : Consommation nette d'énergie par secteur d'activité.

cité dans le secteur résidentiel et tertiaire permet ainsi de se concentrer sur la consommation la plus significative non seulement d'un point de vue quantitatif, en Mtep, mais aussi du point de vue du secteur d'activité le plus proche du citoyen.

Le secteur des transports n'est bien sûr pas à négliger, notamment en ce qui concerne ses conséquences sur l'environnement, comme nous le verrons plus loin. Il pourrait faire l'objet d'une conférence citoyenne en lui-même.

Secteur résidentiel et tertiaire

La répartition de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et tertiaire est détaillée sur la figure 3. Elle est particulièrement instructive. On peut noter que la plus grande consommation d'énergie provient du chauffage. Cela est d'autant plus significatif que cette consommation est essentiellement concentrée sur six mois de l'année ! Elle n'en devient proportionnellement que plus importante durant cette période.

Le reste de la consommation se répartit entre électricité spécifique et production d'eau chaude. L'électricité spécifique représente ici l'énergie qui ne peut être consommée que sous

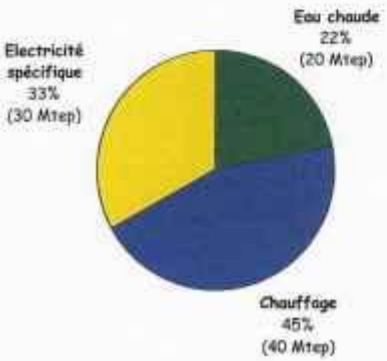


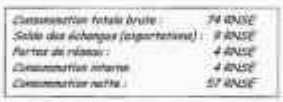
Figure 3 : Consommation nette d'énergie par usage, dans le secteur résidentiel et tertiaire.

forme électrique, par comparaison à la production de chaleur qui peut se faire de différente manière (dont bien sûr aussi l'électricité). Il y a dans ce secteur environ 30 % du chauffage qui se fait sous forme électrique, ainsi que 50 % de la production d'eau chaude.

Cela montre très clairement qu'une discussion de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel et tertiaire ne peut être dissociée de celle de la consommation d'énergie pour le chauffage et pour la production d'eau chaude. Cette consommation d'énergie, sous forme de chaleur, représente les 2/3 de la consommation d'énergie dans ce domaine ! La notion de cogénération, c'est-à-dire de la production conjointe de chaleur et d'électricité, n'en est ainsi que plus essentielle ; nous y reviendrons plus loin.

Structure de la production et consommation d'électricité

Les différentes sources d'approvisionnement en électricité sont indiquées sur la figure 4. L'unité d'électricité produite ou consommée que nous avons choisie ici est le RNSE (voir chapitre précédent).



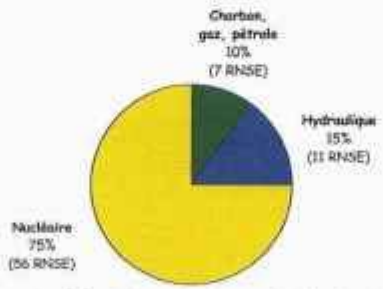


Figure 4 : Répartition de la production brute d'électricité par source d'approvisionnement.

L'approvisionnement en électricité est dominé par les centrales nucléaires. Cette politique d'indépendance énergétique, choisie par la France, a débuté à la fin des années 70. Elle a été soutenue par une croissance très forte de la construction de centrales nucléaires, de puissance 900 MW puis 1 300 MW et enfin 1 450 MW. L'équipement en centrales nucléaires s'est très fortement ralenti depuis cinq ans. Deux tranches de 1 450 MW doivent être reliées au réseau en 2001. Aucune autre centrale n'est en construction actuellement.

La production d'électricité par les centrales hydrauliques est stable (hors conditions climatiques exceptionnelles). La plupart des sites pouvant accueillir un barrage hydraulique sont maintenant équipés, ce qui fait que cette production n'est pas amenée à se développer de manière significative dans les années à venir.

La production des centrales thermiques classiques au charbon ou au fuel, est en diminution. Ces centrales ne sont plus utilisées à temps plein, mais surtout pour faire face aux pics de consommation électrique, notamment en hiver. A l'inverse, les centrales thermiques à gaz sont en fort développement, notamment la nouvelle génération de centrales à cycle combiné, de puissance variable, et pouvant être utilisées en cogénération.

Enfin, une partie non négligeable de l'électricité produite (environ 25 %) n'est pas utilisée directement par le consommateur français : une partie est exportée, l'autre est perdue dans le transport de l'électricité par câble ou pour faire fonctionner les centrales elles-mêmes (consommation interne).

Secteurs d'activité

La consommation nette d'électricité par secteur d'activité est indiquée sur la figure 5. Cette figure fait, là aussi, clairement ressortir la prédominance du secteur résidentiel et tertiaire. Il représente en effet environ les 2/3 de la consommation. Cela démontre la nécessité d'une réflexion et d'une information approfondie du citoyen pour contrôler au mieux cette consommation d'électricité. Elle démontre aussi que les résultats que l'on peut attendre d'une politique volontariste d'une part, et d'une prise de conscience de chacun d'autre part. Une meilleure utilisation des sources d'électricité peut être très significative en terme d'économies d'énergie, si elle est parfaitement ciblée.

La consommation d'électricité dans les transports est négligeable. Elle correspond essentiellement à la consommation des trains électriques. Mais la

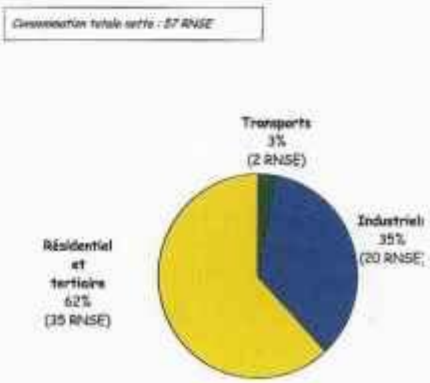


Figure 5 : Consommation nette d'électricité par secteur d'activité.

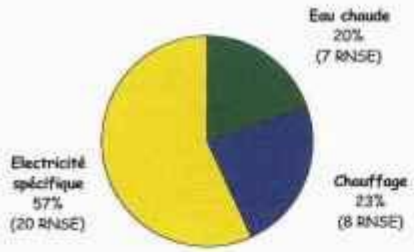


Figure 6 : Répartition de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel et tertiaire.

consommation du secteur industriel est en revanche importante.

Nous avons indiqué sur la figure 6 la répartition de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel et tertiaire. On retrouve ici encore l'importance de la consommation d'énergie sous forme de chaleur, par rapport à la consommation d'électricité, dite spécifique, pour l'utilisation d'appareillages purement électriques.

Consommation d'un foyer

Le niveau le plus élémentaire de la consommation d'électricité est évidemment celui constitué par le foyer. Nous avons indiqué sur la figure 7 la consommation annuelle typique d'un foyer de quatre personnes. On pourra supposer, pour avoir un ordre de grandeur raisonnable, qu'il y a 15 millions de tels foyers en France.

La consommation d'énergie est dominée par le chauffage et la production d'eau chaude. Vient ensuite la consommation d'électricité, notamment celle des appareillages électroménagers. La consommation de l'éclairage et des appareils de télévision et HiFi représente seulement 5 % de la consommation totale d'énergie du foyer.

Ces statistiques en main, il est intéressant de voir, d'un point de vue plus quantitatif, les perspectives ouvertes par les nouvelles technologies pour les économies d'énergie dans ce secteur. Nous avons rassemblé quelques chiffres dans l'encadré ci-contre.

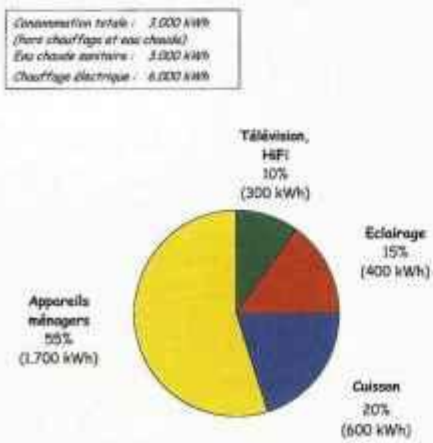


Figure 7 : Consommation annuelle typique d'électricité d'un foyer de quatre personnes.

Les différentes sources d'électricité

Production d'électricité centralisée

La production d'électricité centralisée regroupe toutes les centrales thermiques, qu'elles fonctionnent au charbon, au gaz, au fuel ou encore à l'énergie nucléaire. Leur caractéristique commune est de pouvoir produire de l'électricité en continu, avec une disponibilité de l'ordre de 80 %. La puissance de ces centrales est de l'ordre du RNSE ou d'une fraction de RNSE, et l'unité d'habitation adaptée est l'unité d'habitation urbaine.

Compte tenu des évolutions futures en France, nous ne discuterons ici que des centrales nucléaires et des centrales à gaz. Les centrales à charbon et au fuel, même si elles ne sont pas abandonnées, ne sont pas amenées à se développer fortement.

Evolutions à court et moyen terme

Deux directions de recherche sont actuellement poursuivies pour les centrales nucléaires : nouvelle génération de réacteurs à eau pressurisée, ou filière nouvelle : les réacteurs hybrides. Ces réacteurs hybrides permettent de retraiter in situ les déchets nucléaires. Ils peuvent aussi fonctionner avec du Thorium au lieu de l'Uranium, ce qui peut aboutir, dans certaines conditions d'utilisation, à une radiotoxicité réduite d'un facteur 1000.

Pour les centrales à gaz, les nouvelles générations de centrales thermiques à cycle combiné permettent de faire passer le rendement de 35 à 50 %, et de les utiliser en cogénération pour arriver à un rendement énergétique de près de 85%. Ces centrales sont aussi disponibles dans une large gamme de puissance, de l'ordre de 1/10 à 1/2 RNSE.

En ce qui concerne les coûts, celui de l'électricité produite par ces centrales thermiques est le plus compétitif, de l'ordre de 1/3 à 1/2 prix public/kWh, avec un léger avantage pour les centrales nucléaires. Ces coûts devraient être stables ou en légère hausse dans les années à venir : hausse du prix du gaz, premiers démantèlements des

Economies d'énergie

Pour la production d'électricité spécifique

• Les économies réalisables sur les appareils électroménagers sont du ressort des constructeurs. Notons seulement les très gros efforts réalisés ces dernières années dans ce domaine, et en particulier au niveau de l'information des consommateurs lors de l'achat de ces appareils. Ces économies sont cependant largement compensées par le fait que le consommateur achète des équipements plus puissants, pour une dépense énergétique identique.

• Les nouvelles lampes fluocompactes permettent d'économiser 3/4 de la consommation d'une lampe normale. Cela correspond donc pour un foyer à une économie de 10 % sur sa consommation d'électricité hors chauffage et eau chaude, et 2,5 % sur sa consommation d'énergie totale. Si elles étaient systématiquement utilisées dans tous les foyers français, cela correspondrait à une économie d'environ les 2/3 de la production d'un RNSE.

• Les veilleuses de matériel Hifi et télévision consomment très peu mais sont en fonctionnement 24h sur 24. Pour une puissance de 3W, cela correspond à une consommation annuelle d'environ 1 % de la consommation totale d'électricité (hors chauffage et eau chaude) du foyer. C'est particulièrement faible devant l'économie réalisée par l'emploi de lampes fluocompactes.

Pour la production de chaleur

• Les efficacités actuelles des pompes à chaleur, de l'ordre de 3 à 5, permettent d'arriver à des économies d'énergie particulièrement importantes. Pour un chauffage géothermique utilisant de telles pompes, les économies d'énergie sont alors de l'ordre de 70 % sur la consommation d'électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude. Cela correspond à une économie d'environ 50 % sur la consommation d'énergie totale ! Pour un secteur qui consomme l'équivalent d'une dizaine de RNSE (eau-chaude et chauffage électrique), les économies potentielles sont loin d'être négligeables. Les pointes de consommation en hiver en seront d'autant plus réduites, ce qui permet aussi de réduire le surdimensionnement des centrales pour faire face à ces pics.

• La chaleur nécessaire au chauffage et à la production d'eau chaude peut aussi provenir de centrales thermiques fonctionnant en cogénération. Dans une centrale thermique à gaz à cycle combiné, utilisée en cogénération, lorsque l'équivalent de 1 kWh est consommé en combustible, 0,5 kWh est produit sous forme électrique, et l'équivalent de 0,35 kWh peut être récupéré sous forme de chaleur. Il est donc possible de récupérer (gratuitement ou presque !) 0,7 kWh thermiques lorsque 1 kWh d'électricité est produit. Ce fonctionnement est doublement avantageux. Lorsqu'il remplace un chauffage ou chauffe-eau électrique, il permet d'économiser un certain nombre de RNSE. Lorsqu'il remplace un chauffage ou chauffe-eau au fuel, il permet de diminuer la quantité de gaz carbonique rejeté dans l'atmosphère par ces chaudières, et participe ainsi à la réduction de l'émission de gaz à effet de serre.

centrales nucléaires permettant d'avoir une idée plus précise du coût réel de celui-ci. Ce coût n'inclut pas les coûts externes, ni les coûts du transport et de la distribution de l'électricité produite. Ces derniers coûts sont évidemment inévitables, et commun, dans une large mesure, à toutes les sources d'électricité. Seul le transport en ligne à très haute tension peut être considéré comme inhérent aux centrales de très forte puissance, comme les centrales nucléaires.

Les coûts externes sont particulièrement difficiles à quantifier pour les centrales nucléaires et les centrales thermiques classiques. Ils sont dominés, pour les centrales nucléaires, par le coûts des contaminations radioactives, et, pour les centrales à gaz et à charbon, par celui des conséquences du rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre. Aucun consensus n'existe dans ce domaine. Un programme européen ambitieux, le programme Externe[1], indique les estimations suivantes :
- centrale nucléaire : de 10 à 20 % du coût de production
- centrale au gaz : de 10 à 50 % du coût de production
- centrales au fuel ou au charbon : entre deux à trois fois plus que pour le gaz.

Utilisation rationnelle de l'énergie produite

L'utilisation de centrales nucléaires se traduit par une centralisation maximale. Elle est donc particulièrement adaptée à la production d'électricité pour des grandes métropoles, d'un million d'habitants ou plus. Leur utilisation en cogénération n'est en revanche pas adaptée dans la mesure où la quantité de chaleur produite est bien plus grande que ce qui peut être pratiquement récupéré si la centrale n'est pas située dans l'agglomération même, ce qui est en général le cas.

Le développement de centrales à gaz de tailles plus modestes, qui peuvent facilement être utilisées en cogénération pour du chauffage collectif ou industriel, permet d'entrevoir une utilisation de plus en plus décentralisée.

La rentabilité économique des centrales nucléaires est maximale si l'on s'en tient au coût interne, c'est-à-dire sans tenir compte des coûts externes. Il convient cependant de tenir compte aussi du coût des lignes de transport à très haute tension que ce mode de production centralisé implique. Dans une perspective socio-économique plus large, et dans une période de chômage élevé, il faut aussi noter que les emplois générés par la branche énergie sont aussi d'autant plus faibles que la production est centralisée.

Il peut ainsi être intéressant d'utiliser des centrales à gaz à cycle combiné, avec cogénération, et de puissance moyenne. Le coût externe dû au rejet de gaz carbonique doit alors être compensé d'une autre manière (par des transports propres ?).

La situation en Auvergne

Il n'y a aucune centrale thermique raccordée au réseau en Auvergne. La centrale nucléaire la plus proche, Belleville, est à environ 200 km. Cela implique un réseau important de lignes à très haute tension.

Production d'électricité décentralisée et intermittente

La caractéristique commune de ces sources d'énergie est d'abord leur intermittence. Elles ne sont disponibles que pendant 15 à 35 % de l'année. Si elles sont traditionnellement utilisées de façon décentralisées, dans les foyers isolés par exemple, les progrès récents permettent de parler de « centrales » éoliennes (appelées aussi « fermes ») ou « centrales » solaires.

Le soleil est présent partout et il est particulièrement généreux. En 10 heures, l'énergie solaire totale reçue sur la terre correspond pratiquement au total annuel de toutes les énergies fossiles consommées. Il n'y a pas autant de différences que ce que l'on pourrait croire entre les régions françaises. Par rapport à un environnement moyen, comme par exemple en Auvergne, le nord et le sud de la France bénéficient d'un apport environ 20 % plus faible ou plus fort respectivement.

L'utilisation du vent dans les éoliennes n'est pas nouvelle : le moulin à vent est connu depuis longtemps ! Il en va de même des petites centrales hydrauliques (les moulins à eau). D'énormes progrès ont été réalisés dans les dix dernières années, et de nombreuses fermes éoliennes fonctionnent en Europe. Le développement de la petite hydraulique est lui plus limité. Ces deux sources d'électricité sont cependant sujettes à certaines limitations intrinsèques dans la mesure où elles nécessitent un emplacement judicieusement choisi, pour des raisons de vent suffisant dans le cas de l'énergie éolienne, ou de contraintes écologiques dans le cas de la petite hydraulique.

Cette production intermittente d'électricité implique aussi de pouvoir gérer le stockage de l'électricité produite, ou à défaut son utilisation immédiate. Pour les foyers isolés, cela se fait par l'intermédiaire de batteries. Pour les zones d'habitations, qu'elles soient rurales ou urbaines, il est actuellement nécessaire de relier les sources de production au réseau électrique général. Cela signifie alors que ces sources ne permettent pas d'arriver à une indépendance énergétique totale, mais simplement d'économiser le carburant de centrales classiques (centrales nucléaires par exemple). Ces moyens classiques doivent toujours être surdimensionnés pour faire face aux pointes de consommation, en hiver notamment.

Evolutions à court et moyen terme

Au niveau des solutions scientifiques et techniques, des éoliennes de plus en plus puissantes sont maintenant produites en série par plusieurs industriels européens. Elles sont regroupées dans les meilleurs sites.

L'utilisation directe de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage (solaire dit thermique) est au point. De gros progrès, dans les 20 années à venir, sont à attendre des panneaux photovoltaïques pour la production directe d'électricité, avec un rendement de plus en plus grand (vers les 20-25 %, actuellement de 10 à 15 %), et un prix de revient le plus faible possible. En ce qui concerne les micro-centrales hydrauliques, les turbines sont maintenant classiques.

Le coût actuel du kWh produit par les fermes d'éoliennes est de l'ordre de 1/3 à 1/2 prix public/kWh. Notons que le prix du kWh éolien baisse aussi constamment : il a chuté de 30 % en 5 ans. Il devrait continuer à diminuer dans les années à venir, cependant probablement plus lentement.

Les coûts des panneaux photovoltaïques sont encore prohibitifs, mais leur production en grande série, et les progrès techniques, devraient rendre l'énergie solaire photovoltaïque presque compétitive (de 1 à 1,5 prix public/kWh) dans les dix années à venir.

Utilisation rationnelle de l'énergie produite

Plusieurs cartographies des gisements éoliens existent en Europe et en France. Ces documents font notamment apparaître les zones « riches », à savoir les régions côtières exposées aux vents du large (Manche et Bretagne), ou la région du Languedoc-Roussillon. Les plus fortes puissances sont en moyenne observées en hiver, elles sont minimales en été. Le jour est en général plus venté que la nuit, du fait de l'instabilité des masses d'air.

L'utilisation de l'énergie solaire est particulièrement souple et simple. Sa disponibilité s'avère dans une certaine mesure, complémentaire de celle de l'énergie éolienne, notamment suivant les saisons.

1 Le détail de ce programme peut être trouvé sur le site http://externe.jrc.es/overview.html

La question qui reste en suspens pour ces source d'énergie est celle du stockage de l'énergie. La difficulté vient pour partie de l'inadaptation entre périodes de consommation et périodes de production (hiver/été, heures de pointe...).

Ce stockage de l'électricité pourrait d'ailleurs permettre déjà à l'heure actuelle d'économiser environ 20 % de puissance installée en stockant l'énergie en heure de faible consommation pour la restituer en heure de forte demande. Cela est fait en particulier par les centrales hydrauliques réversibles (centrales STEP). La surcapacité induite à l'heure actuelle pour faire face à ces pointes de consommation serait de l'ordre de 10 à 15 RNSE. Ces sources d'électricité décentralisées pourraient aussi constituer un potentiel d'emploi particulièrement grand et complètement sous-exploité en France.

La rentabilité économique est maintenant bonne pour les fermes éoliennes raccordées au réseau. Cela est dû au prix de rachat par EDF de l'électricité produite qui, même s'il n'est pas aussi élevé que dans certains pays européens, permet de rentabiliser les investissements sur une période raisonnable. Elle est aussi très bonne pour les sites isolés, même en incluant le prix des batteries pour le stockage de l'énergie, dans la mesure ou l'on fait l'économie des lignes de transport.

L'investissement nécessaire pour l'implantation d'éoliennes est cependant énorme : il correspond à 1,5 millions d'euros (10 millions de francs) pour une Unité d'habitation rurale, et 600 millions d'euros (4 milliards de francs) pour une Unité d'habitation urbaine.

La rentabilité des panneaux solaires photovoltaïques est aussi très bonne pour les sites isolés. Pour une utilisation à plus grande échelle, l'investissement nécessaire est également actuellement très important : 8 millions d'euros (50 millions de francs) pour une Unité d'habitation rurale, et près de 3 milliards d'euros (20 milliards de francs) pour une Unité d'habitation urbaine. Il pourrait être divisé par deux ou trois à moyen terme. Pour les utilisations individuelles actuelles, cet investissement correspondant environ à 10 ou 15 ans de consommation électrique (chauffage et/ou eau chaude sanitaire).

Les micro-centrales hydrauliques sont maintenant compétitives, mais le coût des études d'impact sur la faune des rivières est prohibitif. Celui-ci doit être rentabilisé sur une très longue période.

La situation en Auvergne

Sur l'atlas européen des gisements éoliens, l'Auvergne n'apparaît, que par quatre points : Aurillac, Clermont-Ferrand, le Puy et Vichy ! Une étude détaillée est d'autant plus importante que la puissance du vent varie comme le cube de la vitesse, et il est donc tout à fait envisageable d'utiliser des zones de surventes locales. Une étude en ce sens a été lancée à l'Université Blaise-Pascal.

L'Auvergne est de ce point de vue un terrain d'expérimentation idéal pour l'utilisation de ces sources d'électricité décentralisées et intermittentes. De nombreux foyers isolés sont déjà équipés. Son extension à un type d'habitat rural serait particulièrement intéressant.

Sources d'énergie alternatives

Il est difficile de trouver des caractéristiques communes aux trois sources d'énergie suivantes : pile à combustible, géothermie où filière bois-énergie. Nous les qualifions d'alternatives dans la mesure où elles ne sont encore pas très connues ou développées. Elles ont aussi en commun le fait que les développements récents sont particulièrement prometteurs, et qu'ils sont complètement méconnus du grand public.

Evolutions à court et moyen terme

Ces évolutions sont particulièrement rapides en ce qui concerne les piles à combustible. Les solutions techniques pour ces piles existent. Il convient de les miniaturiser le plus possible et de maîtriser le stockage du carburant (hydrogène, gaz naturel, méthanol...). Il existe actuellement un effort très vigoureux de recherche et développement dans ce domaine. L'hydrogène nécessaire à son fonctionnement pourrait, à moyen ou long terme, provenir de l'hydrolyse de l'eau (séparation sous l'effet d'un courant électrique de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans l'eau).

Par l'intermédiaire de l'hydrogène, ce système fonctionnerait alors comme un véritable moyen de stockage de l'électricité produite, en utilisant simplement l'eau comme combustible dans l'hydrolyse, et comme rejet dans la pile à combustible.

En ce qui concerne la géothermie, de très gros progrès ont été faits récemment sur les problèmes de corrosion et pour rendre les forages de plus en plus faciles. Cette source d'énergie est maintenant opérationnelle pour le chauffage individuel en utilisant une pompe à chaleur.

De nouvelles centrales thermiques et chaudières à bois ont été mises au point. Elles sont complètement automatisées, avec chargement en plaquettes de bois provenant des déchets compactés de la filière bois.

Le coût de l'énergie produite par les piles à combustible est encore élevé, mais il devrait devenir rapidement compétitif dans les cinq années à venir. Celui de la géothermie, et de la filière bois-énergie est déjà compétitif.

Utilisation rationnelle de l'énergie produite

Les services rendus à la collectivité par les piles à combustibles sont extrêmement variés : voiture électrique, électricité et chauffage individuel et collectif, batteries.

L'utilisation de la géothermie concerne essentiellement l'habitat neuf pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, en utilisant une pompe à chaleur. Ce type de chauffage pourrait remplacer à terme le chauffage tout électrique.

La production de chaleur et d'électricité par chaudières à bois permet de valoriser les déchets de la filière bois. Elle doit être utilisée localement, au niveau de la production même de ces déchets, pour éviter les problèmes de transport de la matière première.

En ce qui concerne la rentabilité de ces sources alternatives d'électricité, elle est déjà assurée pour la géothermie. La rentabilité économique des piles à combustibles sera quant à elle bonne dans les cinq années à venir. Enfin, la rentabilité économique de la filière bois-énergie est aussi très bonne, d'autant plus qu'elle inclut la valorisation directe des déchets de la filière bois.

La situation en Auvergne

Il n'existe pas d'équipements en pile à combustible en Auvergne. En revanche, des chaudières à bois ont été installées ces dernières années, et ce domaine est en fort développement : la moitié des déchets de la filière bois sont déjà valorisés ainsi.

Comme dans de nombreuses autres régions de France, quelques pompes à chaleur existent dans des maisons individuelles, et des installateurs commencent à s'intéresser à ce domaine.

Impacts environnementaux

Les impacts sur l'environnement de l'utilisation des sources d'électricité sont très variés, avec des conséquences très diverses. Et ils interviennent sur des échelles de temps et d'espace très différentes. Il convient donc de bien séparer leurs conséquences suivant ces échelles, afin de pouvoir identifier clairement leurs impacts réels, et les moyens nécessaires à mettre en œuvre, et par qui, pour les réduire si ce n'est les éliminer complètement.

Nous porterons notre attention sur les sources d'électricité suivantes :
- centrales nucléaires
- centrales à gaz, chaudières à bois, et piles à combustible
- éoliennes, panneaux solaires et micro centrales hydrauliques

L'utilisation de la géothermie pour se chauffer et produire de l'eau chaude à l'aide de pompe à chaleur n'a aucun impact significatif sur l'environnement autre que celui lié à sa consommation d'électricité. Les piles à combustible, lorsqu'elles sont alimentées directement en hydrogène, ne produisent que de l'eau ! En revanche, lorsqu'elles sont alimentées par du gaz naturel, elles produisent du gaz carbonique, au même titre que les centrales à gaz.

Au niveau local

Les premières pollutions peuvent apparaître au niveau de la fabrication industrielle des éoliennes ou des panneaux solaires. Elles ne sont pas propres à la production d'électricité, mais relèvent plutôt de la pollution de toute production industrielle. La seule restriction concerne la fabrication à grande échelle de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium. Ces processus de production devront être particulièrement soignés du point de vue de leur impact sur l'environnement.

Le deuxième type de nuisance est celui provenant de l'implantation de ces sources d'électricité dans le paysage. D'énormes efforts ont été faits quant au design des éoliennes et à intégration dans le paysage. L'implantation judicieuse de quelques éoliennes autour d'une unité d'habitation rurale peut parfaitement se concevoir d'un point de vue architectural. Cela est certainement plus difficile pour une batterie de plusieurs centaines d'éoliennes nécessaires pour l'alimentation en électricité d'une unité d'habitation urbaine.

En ce qui concerne les panneaux solaires, très peu d'efforts ont été faits en France pour leur intégration dans l'architecture des maisons, contrairement à ce qui se passe en Autriche ou dans les pays du Nord.

De plus, les éoliennes peuvent avoir un impact significatif sur la faune. Leurs pales constituent en effet un danger pour les oiseaux migrateurs. Enfin la nuisance sonore liée à leur fonctionnement, même si elle a fortement diminué avec les nouvelles générations d'éoliennes, ne pourra jamais être complètement éliminée. Elle doit être acceptée par les riverains.

Occupation des sols

Pour ce qui concerne toute la production et l'acheminement de l'électricité sur les lieux de consommation, cette notion d'occupation des sols est un élément important. Elle est souvent oubliée dans toute discussion relative à l'aménagement du territoire. Elle n'en est pas moins essentielle.

• L'occupation des sols est la plus faible pour les centrales thermiques. Elle est dominée par les lignes de transport à très haute tension pour les centrales nucléaires. Les centrales à gaz, avec une gamme de puissance plus étendue, peuvent être installées très près des centres de consommation et dépendent donc beaucoup moins de ces lignes.

• Pour les éoliennes, l'occupation au sol est faible sur terre (sur terres agricoles), car l'espace entre éoliennes peut être cultivé. Ce n'est pas vrai pour les installations en mer dans la mesure où, pour des raisons de sécurité évidente pour la navigation de plaisance ou de pêche, les zones entières pourraient être interdites.

• Pour l'énergie solaire, l'occupation au sol des panneaux est négligeable seulement si ceux-ci sont intégrés dans l'architecture des maisons.

Contaminations radioactives

Nous parlerons ici de la contamination résiduelle provenant du fonctionnement normal d'une centrale nucléaire. Celle-ci doit bien sûr se discuter en même temps que la contamination due à la radioactivité naturelle des régions d'habitation elles-mêmes.

Une vaste nomenclature existe pour caractériser la dose de rayonnement ionisant (de type α, β ou γ) émise ou reçue. Nous nous limiterons ici à deux notions : l'activité d'un corps radioactif, mesurée en becquerels, et la dose reçue par un organisme humain, mesurée en Sievert. Seule cette dernière donnée permet de déterminer les conséquences sanitaires, pour l'homme, d'une irradiation, qu'elle soit externe (par des éléments radioactifs présents dans la nature), ou interne (par absorption de produits contaminés).

• *Activité en becquerels (Bq)* : Un becquerel correspond à la désintégration d'un noyau par seconde. C'est une très petite unité de mesure. Une tonne de granit présente une activité de 7 à 8 millions de becquerels. La radioactivité interne naturelle du corps humain correspond à 100 Bq par kilogramme, soit environ 6 000 désintégrations par seconde pour un homme.

• *Dose reçue en Sievert (Sv) et milli Sievert(mSv)* : Pour une même quantité d'énergie absorbée, les divers rayonnements n'agissent pas de la même manière sur les fonctions cellulaires par suite de la différence de répartition spatiale des ionisations. La dose efficace reçue par un organisme vivant, mesurée en Sievert, dépend de plusieurs facteurs : de la quantité d'énergie cédée par le rayonnement pour chaque kilogramme de matière qu'il traverse, de la nature du rayonnement : α, β ou γ, de la nature des tissus traversés. Ces doses correspondent à des moyennes sur tout le corps humain.

Cette définition un peu complexe des doses est plus facile à comprendre quand elle est mise en relation avec le

Unité de mesure	mSv	Paquets de cigarettes
Irradiation naturelle	3	15
Radon	2	10
Rayons cosmiques	0,3	1,5
Rayons X médicaux	0,4	2
Séjour d'un an à 2000 mètres	0,8	4
Irradiation française suite à l'accident de Tchernobyl	0,05	0,25
Centrales nucléaires	0,0005	0,0025

Tableau 1 : Les doses annuelles reçues dans des conditions normales.

Unité de mesure	mSv	Paquets de cigarettes
Public	1	5
Evacuation de Tchernobyl	5	25
Professionnels exposés aux irradiations	20	100

Tableau 2 : Doses annuelles maximales admissibles selon la réglementation en vigueur.

risque majeur lié à l'irradiation : le développement des cancers. Par analogie, on comparera ainsi ce risque à un autre risque cancérigène maintenant clairement démontré : la cigarette. On peut estimer qu'une dose de 1 Sv par an reçue par un homme correspond au même risque de développer un cancer que s'il avait fumé 5 000 paquets de cigarettes. Soit l'égalité 1mSv=5 paquets de cigarette. Nous avons indiqué dans le tableau 1 un certain nombre de taux d'irradiations auxquels tout citoyen peut être soumis (hors phénomènes de concentrations naturelles dans le cycle alimentaire, qui doivent être étudiées au cas par cas, et qui ne doivent pas être négligées).

Il serait grotesque de vouloir se protéger de l'irradiation naturelle. La logique veut donc que les doses admissibles soient calculées sur celles, inhabituelles, reçues en plus de l'irradiation naturelle. Ces doses sont indiquées dans le tableau 2.

La limite de 1 mSv pour le public est à comparer à la variation, de l'ordre de 3 mSv, que l'on trouve dans le taux d'irradiation naturelle entre les régions peu radioactives et celles très radioactives (Bretagne ou Auvergne). Elle est donc particulièrement restrictive.

Il est reconnu et admis depuis longtemps que l'irradiation forte (au-delà d'un Sievert) conduit rapidement à un cancer, et à la mort quasi-certaine au delà de 5 Sieverts. Que se passe-t-il en revanche lors de l'exposition répétée à des doses très faibles, de l'ordre de deux à trois fois la dose d'irradiation naturelle (soit entre 5 et 10 mSv) ? En terme de santé publique on pourrait poser la question de cette manière : est-ce que le risque de développer un seul cancer mortel est le même pour une population de 1 000 personnes fumant 1 paquet de cigarettes par an ou pour trois personnes fumant chacun un paquet de cigarettes par jour (le nombre de paquets de cigarettes consommées étant alors pratiquement le même) ?

La relation entre la dose et l'effet sur les tissus n'est certainement pas fondée sur une loi de proportionnalité. Lorsque l'on diminue la dose on diminue encore plus vite les effets. Quelques études de laboratoire sur les souris montrent même une résistance accrue des individus faiblement irradiés, comme si l'effet pouvait être bénéfique à des doses très faibles (un verre de vin rouge est bon pour la santé, trois verres dangereux !).

En conclusion, il est clair que les moyens de réduire et de contrôler ces contaminations radioactives existent. Il convient de les mettre en œuvre systématiquement au niveau de chaque installation nucléaire. Elles doivent cependant toujours être comparées à la contamination radioactive naturelle, particulièrement forte en Auvergne par exemple. Cela permet de dédramatiser un peu ces risques, dans la mesure où les doses absorbées sont faibles.

Au niveau d'un département

Ces impacts sont relativement faibles pour toutes les sources d'électricité étudiées ici, à l'exception de l'utilisation des micro-centrales hydrauliques.

La construction et l'utilisation de micro-centrales hydrauliques est régie par un certain nombre de réglementations, dont certaines datent de 1919 ! Les demandes d'autorisations doivent obligatoirement comporter une étude d'impact sur l'environnement. La principale contrainte concerne la construction de passes à poisson, et la nécessité de préserver l'écoulement normal de la rivière en aval. Ces autorisations sont décernées au niveau départemental. Certaines rivières sont d'ailleurs complètement interdites d'équipement (parfois même dans tout un département, comme dans le Cantal par exemple).

Au niveau d'un continent

C'est le cas typique d'un accident nucléaire majeur, comme celui que nous avons connu pour Tchernobyl. Celui-ci a bien sûr des conséquences graves localement, mais aussi au niveau de tout un continent. Les substances radioactives émises lors de l'accident sont disséminées dans l'atmosphère, et entraînées par les masses d'air bien loin de leur lieu d'émission (« nuages radioactifs »).

Au niveau local, les taux d'irradiations très forts entraînent souvent la mort, ou des séquelles graves (malformations à la naissance, cancers, leucémies). À l'échelle d'un continent, les contaminations radioactives sont du même type que celles que nous avons abordées au niveau des impacts locaux. Elles nécessitent les mêmes règles pour la formation, et l'information des citoyens, notamment en ce qui concerne les règles de précaution à prendre en cas de concentration de la radioactivité dans certains aliments.

Une nouvelle génération de centrales nucléaires est en cours de développement en Europe pour limiter au maximum ce type d'accident.

Au niveau de la planète

Les impacts au niveau de la planète entière des rejets dans l'atmosphère de gaz à effet de serre n'ont été vraiment étudiés que dans les dix dernières années. Ces gaz proviennent en particulier du fonctionnement des centrales thermiques, qu'elles soient au charbon, au fuel ou au gaz, ou encore des chaudières individuelles à gaz.

Même si il n'existe aucune preuve formelle du rôle du rejet d'un certain nombre de gaz (gaz « à effet de serre ») sur le réchauffement de la planète, le principe de précaution nous incite à intervenir dès maintenant. Le principe de l'effet de serre est connu. Il est similaire à celui du fonctionnement d'une véranda. L'atmosphère laisse passer une certaine partie du rayonnement solaire qui chauffe la terre. Celle-ci à son tour reémet une partie du rayonnement qui est bloqué par l'atmosphère, d'où un piégeage de ce rayonnement au niveau de la surface de la Terre, et une augmentation de la température par rapport à ce qu'elle serait sans ce piégeage. Cet effet est vital pour la vie sur Terre, car c'est lui qui permet d'avoir une température de 18° sur la Terre. En revanche, une augmentation du rejet de certains gaz dans l'atmosphère (CO_2, CH_4, CFC, N_2O,...) augmente cet effet et donc conduit à une élévation de la température. Celle-ci a augmenté de 1° au XX^{ème} siècle, et augmentera d'environ 2° au XXI^{ème} siècle. L'effet principal est dû au gaz carbonique (CO_2) car il est le plus important. Le méthane est bien plus dangereux en soi, mais il en est émis beaucoup moins.

L'élévation de la température à la surface de la Terre n'est pas en soi nouvelle. La température terrestre suit une courbe de variation sinusoïdale de période 8 000 ans. Mais une élévation de température aussi élevée (3°) ne s'obtient que sur un intervalle de temps de 200 000 ans. Ce qui est inédit c'est la rapidité de cette élévation de température : 3° en deux siècles. Cette rapidité fait que l'écosystème n'a pas le temps de s'adapter, et conduit à des perturbations plus ou moins graves. Parmi les conséquences attendues :

Rejets actuels de gaz carbonique par les centrales thermiques classiques

Les centrales thermiques classiques actuelles rejettent approximativement 40 millions de tonnes de gaz carbonique dans l'atmosphère, dont 70 % par les centrales au charbon, le reste étant partagé entre centrales au gaz et au fuel. Ces rejets représentent un peu plus de 10 % du rejet total de gaz carbonique (350 millions de tonnes) dans l'atmosphère.

Les progrès accomplis ces dernières années sur les centrales à gaz à cycle combiné, avec un rendement amélioré, se traduisent par des rejets bien moins importants. Pour une telle centrale, le rejet est de l'ordre de 2,5 millions de tonnes pour la production électrique d'un RNSE. Les 40 millions de tonnes produits actuellement peuvent donc être reconvertis pour produire 16 RNSE en lieu et place des 7 RNSE actuels (voir fig. 4). Si ces 16 RNSE sont systématiquement utilisés en cogénération, ils permettent, pour la même quantité de gaz carbonique produite, de bénéficier de 7 RNSE supplémentaires utilisables pour produire de l'eau chaude ou du chauffage. En effet, pour un RNSE d'électricité produite, on peut récupérer l'équivalent de 0,7 RNSE d'énergie thermique. Cette énergie thermique remplace alors celle produite par des chaudières au gaz ou au fuel de rendement typique 80 %, soit l'équivalent de 0,7/0,8 RNSE d'énergie thermique produite. Cette énergie thermique économisée, si elle est utilisée à son tour par des centrales à gaz à cycle combiné de rendement électrique 50 %, représente ainsi 0,7/0,8*0,5 RNSE. Les 16 RNSE utilisés en cogénération représentent ainsi 7 RNSE de production électrique supplémentaires. Ces 7 RNSE à leur tour peuvent être utilisés en cogénération... et ainsi de suite !

• Augmentation du niveau de la mer de 50 cm d'ici la fin de ce siècle. Cette élévation de température est irrémédiable (fonte des glaciers et diminution de la densité de l'eau avec la température). En effet, même si nous arrivions à ne plus augmenter le taux de gaz carbonique rejeté dans l'atmosphère, il faudrait une centaine d'années avant de stabiliser ce taux, plus une cinquantaine d'années avant que la température elle même ne se stabilise. Il faudra encore attendre 50 ans pour que la fonte des glaces se stabilise. L'échelle de temps est ainsi d'environ deux siècles, ce qui permet de dire que l'élévation actuelle de température est due à l'industrialisation du XIX^{ème} siècle ! Plusieurs conséquences plus ou moins dramatiques de l'élévation du niveau de la mer sont faciles à deviner : disparition de nombreux massifs coralliens, inondations de nombreuses côtes, notamment dans les pays du sud, les pays froids deviendront tempérés, et de nombreuses stations de ski de moyenne altitude n'auront plus de neige !

• Augmentation du nombre de perturbations atmosphériques : cyclones, tornades...

• Recrudescence de maladies tropicales : malaria, « dingue »...

Il est clair que la solution de ce problème à long terme passe aussi par une maîtrise du rejet de ces gaz par des pays comme l'Inde ou la Chine (si tous les Chinois troquaient leur vélo contre une voiture... !).

Deux rencontres importantes ont eu lieu pour essayer de trouver une solution à ces questions : Rio en 1992 et Kyoto en 1997. Aucun accord signé à Kyoto n'a cependant encore été ratifié par les parlements des pays concernés. Le principe des engagements est simple : stabiliser les émissions de gaz à effet de serre en 2008-2012 au niveau de ceux obtenus en 1990.

Pour l'Europe, cela se traduit par une baisse de 8 % en moyenne, et pour la France par une stagnation (évolution 0 %) des émissions. Cela est dû essentiellement au très faible rejet du secteur de production d'électricité en France (fondé essentiellement sur l'utilisation de centrales nucléaires qui ne rejettent aucun gaz à effet de serre). Cet objectif de 0° de rejets supplémentaires est cependant particulièrement difficile à atteindre compte tenu d'une croissance soutenue de l'ordre de 2 à 3 % par an. Il convient donc d'avoir des actions fortement incitatives pour l'atteindre.

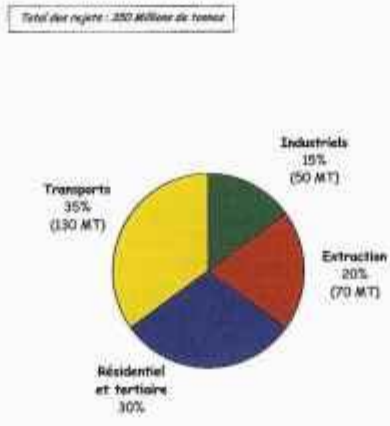


Figure 8 : Rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère par secteur d'activité, en millions de tonnes (MT).

Il est beaucoup question, dans les bilans de production de gaz carbonique, du rôle de « puit de carbone » constitué par les forêts. En effet, celles ci, lorsqu'elles sont en croissance, consomment du gaz carbonique présent dans l'atmosphère, et le fixent. Ce gaz carbonique est à son tour rejeté dans l'atmosphère lorsque le bois est brûlé, dans une chaudière à bois par exemple.

On pourrait ainsi considérer, en première approximation, que ces chaudières à bois ont un effet nul, ou quasi-nul, sur l'émission de gaz carbonique. En pratique, cela n'a pas vraiment été démontré dans la mesure où le gaz carbonique libéré par le fonctionnement d'une chaudière à bois ne l'est pas toujours au même endroit, ni à la même période que sa captation par les forêts. Cela nécessite de plus une gestion rigoureuse des forêts.

Nous le voyons bien, le problème du rejet de gaz à effet de serre est un problème qui dépasse largement le cadre de vie du citoyen. Il n'en demeure pas moins que c'est en sensibilisant, et responsabilisant, le citoyen sur ces problèmes, qu'une solution à long terme pourra être mise en œuvre.

Si la production d'électricité est aussi productrice de gaz carbonique, par les centrales à gaz par exemple, elle n'est pas la seule. La réduction globale de l'émission de gaz à effet de serre passe par une prise en compte globale de toutes les activités responsables de cette émission, en considérant la production d'énergie au sens large. Comme nous pouvons le voir sur la figure 8, cela inclut l'électricité, les transports, et toutes les activités industrielles.

Conclusions

Pour évaluer l'utilisation des différentes sources d'énergie, la réflexion du panel des citoyens s'est articulée autour de trois objectifs, souvent présentés comme contradictoires :

- le service rendu à la collectivité
- la protection de l'environnement
- la rentabilité économique

Au-delà des considérations purement techniques que l'on peut retrouver dans de nombreux rapports, seule une discussion ouverte entre citoyens et experts – telle qu'elle a eu lieu dans le cadre de cette conférence citoyenne – peut permettre d'établir un équilibre harmonieux entre ces trois objectifs.

Le panel des citoyens s'est ensuite intéressé aux rôles respectifs que peuvent – et doivent – jouer d'une part le citoyen lui-même, et d'autre part les pouvoirs publics.

Afin de ne pas diluer sa réflexion sur un sujet trop vaste, le panel des citoyens s'est concentré sur la production d'électricité dans le secteur résidentiel et tertiaire. Il n'a pas abordé, par exemple, la question des transports, mais certaines de ses réflexions débordent largement de ce cadre.

Le service rendu à la collectivité

Ce service rendu à la collectivité est trop souvent transcrit par un seul chiffre : le nombre de kWh moyen consommé, en France, par habitant. C'est probablement utile si on considère que l'énergie est une « marchandise » comme une autre, que chaque habitant doit « consommer » pour pouvoir vivre.

En revanche, ce chiffre ne peut traduire la fonction de « service » que représente aussi l'accès à l'énergie pour tous, avec sa composante indispensable d'aménagement du territoire. Et ce service s'exerce différemment pour un foyer isolé, une communauté rurale de 1 000 habitants, une unité d'habitation urbaine de 250 000 habitants, ou encore pour une grande agglomération d'un million d'habitants ou plus.

Du foyer isolé à l'habitat rural

En ce qui concerne l'approvisionnement en électricité de l'habitat dispersé, les solutions existent déjà, et se révèlent compétitives dans la mesure où elles peuvent se concevoir sans ligne de transport. C'est le cas des éoliennes, des panneaux solaires photovoltaïques, ou des microcentrales hydrauliques.

Les progrès techniques de ces dix dernières années ont cependant permis d'envisager de nouveaux usages à grande échelle de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire. Mais il convient de bien cerner leur échelle d'utilisation et les contraintes qui y sont associées.

Les éoliennes sont actuellement regroupées dans des « fermes » bien localisées. Si cela permet d'exploiter au mieux les ressources en vent de plusieurs régions en France, il faut cependant admettre que leur production d'électricité demeure limitée et pratiquement réservée au milieu rural ou semi-rural. Dans ce cas, leur implantation doit s'envisager en concertation directe avec la population, dans le cadre d'un programme cohérent d'aménagement du territoire.

Même si elle n'est pas encore très répandue – surtout pour des raisons économiques que nous verrons plus loin – l'utilisation de l'énergie solaire est plébiscitée par le panel des citoyens. Cette forme d'énergie a l'avantage de pouvoir être utilisée sur pratiquement tout le territoire français et de s'intégrer facilement à l'habitat. Son utilisation est très souple : foyer isolé, habitat rural, et pourquoi pas, habitat urbain.

L'emploi de la géothermie comme source individuelle de chaleur n'est pas encore très répandu en France, probablement par manque d'information. Au-delà de l'exploitation de sources géothermiques à haute et très haute température, très localisées et peu nombreuses en France, l'utilisation de pompes à chaleur pour récupérer, l'hiver, la chaleur emmagasinée dans le sol, même à faible profondeur, et la restituer l'été, en refroidissant les habitations est cependant en plein développement. Elle est maintenant accessible à tous à un prix compétitif. Son utilisation devrait faire l'objet de campagnes d'information actives, comme l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire.

De l'habitat rural à la ville moyenne

A ces échelons de taille et pour des habitats collectifs ou des PME/PMI, plusieurs sources d'énergie nouvelles sont disponibles, et envisageables, à court ou moyen terme selon leurs conditions de rentabilité. Nous en avons sélectionné deux :

- Les piles à combustibles. Leur utilisation est très similaire à celle des centrales à gaz de taille moyenne ou petite, avec une très grande souplesse d'utilisation, privilégiant selon le cas, production d'électricité ou production de chaleur. Leur développement doit être favorisé dans les années à venir.

- Les chaudières à bois. Les nouvelles technologies de mise en forme des déchets de bois, dans des chaudières de nouvelle génération, ont complètement bouleversé les perspectives d'utilisation du bois-énergie. Elles doivent être utilisées pour gérer tous les déchets de la filière bois, ce qui constitue déjà un objectif ambitieux, notamment en Auvergne. Il convient cependant de noter que le bois en tant que tel a d'autres utilisations, plus « nobles », comme matériaux de construction ou de décoration par exemple. Cette utilisation est certainement plus valorisante, pour une région, que de l'employer comme simple combustible.

De la ville moyenne à la grande agglomération

Dans ce cas, le panel des citoyens reconnaît qu'un système de production d'électricité centralisé s'avère le plus adapté. Tant pour faire face à une consommation importante d'électricité dans le secteur résidentiel et tertiaire que pour les besoins du secteur industriel. Ce rôle est rempli en France par des centrales nucléaires. Il n'est pas remis en cause.

Il pourrait aussi être rempli par des centrales à gaz de nouvelle génération. Ces centrales à gaz, de taille très variable, peuvent participer aussi à la décentralisation des sources de production. Elles présentent l'énorme intérêt de pouvoir fonctionner en cogénération. Ce mode de fonctionnement doit être privilégié autant que faire se peut . Cela implique probablement des centrales de taille moyenne, directement implantées près des utilisateurs, ce qui restreint leur utilisation dans les zones urbaines de taille aussi moyenne.

La protection de l'environnement

Les différentes sources d'électricité sont loin d'être équivalentes en termes d'influence sur l'environnement. Ainsi, leurs conséquences se font sentir à des échelles de temps et d'espace très différentes d'une source à l'autre, impliquant par là-même des niveaux d'intervention et de responsabilité très divers.

Les risques des diverses sources d'électricité

Nous ne nous intéresserons pas aux conséquences – certes potentiellement

importantes mais pas spécifiques à la production d'électricité – de toute la filière industrielle mise en œuvre pour la production des outils eux-mêmes (centrales, fabrication industrielle des éoliennes,...). Cela concerne directement la pollution engendrée par toute activité industrielle moderne et sort largement du cadre de cette conférence. Notons tout de même quelques contraintes qui pourraient s'accroître dans les années à venir.

La filière de fabrication des panneaux solaires photovoltaïques fait appel à du silicium. Ses conséquences sur l'environnement doivent être mesurées, et traitées, avant de lancer des processus de fabrication à grande échelle. Il en est de même pour tous les produits chimiques intervenant dans les piles à combustible – produits qui demandent à être changés régulièrement – ce qui pose le problème de leur retraitement ou de leur recyclage.

A l'échelon le plus local, le choix de panneaux solaires, qu'ils soient photovoltaïques ou thermiques, ne nécessite qu'une intégration judicieuse dans l'architecture locale. Un effort de recherche architecturale encore plus poussé est nécessaire, comme cela est le cas dans d'autres pays européens. Ces efforts nécessitent de l'ingéniosité et des idées originales, plus que des investissements financiers importants.

Le cas des fermes éoliennes est plus délicat. Si de gros efforts ont été faits pour intégrer les éoliennes dans le paysage, les nuisances sonores et les implications sur le déplacement des oiseaux ne sont pas anodines. Cela demande une concertation digne de ce nom avec les populations directement concernées.

L'implantation des fermes éoliennes en mer, si elle permet de s'affranchir de nuisances sonores pour les riverains, peut être dommageable en matière de sécurité, pour les pêcheurs et les navigateurs côtiers et dangereuse pour les oiseaux de mer. Ces contraintes doivent aussi être étudiées et discutées. Voilà une opportunité idéale d'expérimenter le long des côtes de la Manche le principe d'une conférence citoyenne !

Le panel des citoyens est unanime à considérer que le développement de microcentrales hydrauliques ne doit pas être favorisé, au-delà de la simple reconversion des anciens moulins à eau. Cette reconversion doit être traitée au cas par cas, en étudiant soigneusement son influence sur l'écosystème.

Le développement de centrales à gaz de nouvelle génération (à cycle combiné pour améliorer leur rendement, et en cogénération pour récupérer la chaleur dissipée) pose le problème du contrôle de l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère, avec ses conséquences probables sur le réchauffement de notre planète. C'est un problème qui se pose à l'échelle mondiale, mais qui doit être traité pays par pays, région après région. Il convient d'aborder cette question de façon pragmatique, sans occulter le rôle important de chaque citoyen, ni celui que les pouvoirs publics doivent assumer.

Le problème du gaz carbonique

Le contrôle de l'émission de gaz carbonique doit être envisagé globalement : centrales thermiques, transports et production industrielle. Cette préoccupation déborde largement le cadre de cette conférence citoyenne. Il pourrait d'ailleurs faire l'objet d'une nouvelle conférence sur ce thème précis.

Nous noterons seulement que les développements récents sur les piles à combustible pour alimenter des voitures électriques de nouvelle génération, ou le développement de voitures hybrides (moteur thermique et moteur électrique) pourraient permettre, dans un avenir proche, de diminuer de façon draconienne la consommation d'essence ou de gasoil dans les transports. De telles voitures hybrides sont d'ailleurs déjà proposées au catalogue de certains constructeurs. Ces évolutions nous paraissent aussi significatives qu'un changement, toujours souhaité mais jamais vraiment observé, du comportement de chaque citoyen vis-à-vis de sa voiture! De tels progrès, associés à une volonté politique forte de privilégier le transport en commun, pourraient assurer un contrôle durable des émissions de gaz carbonique.

Le respect de l'environnement passe aussi bien sûr par la limitation de la consommation énergétique elle-même. Il est de bon ton de responsabiliser les citoyens sur les économies d'énergie qu'ils doivent faire : isolation renforcée de leur habitation, emploi de lampes fluorescentes... Ces économies sont indispensables et de très gros efforts ont été faits ces dernières années, et continueront à l'être. Ce message s'adresse aussi à toutes les collectivités territoriales. De nombreux progrès, peut-être même plus significatifs que dans l'habitat individuel, devraient pouvoir, là encore, être accomplis.

Il nous semble cependant que les plus grosses économies d'énergie devraient résulter de la généralisation de la production de chaleur en cogénération. Elle constitue un vivier d'économies d'énergie complètement sous-employée, et qui nécessite une nouvelle distribution de la production d'électricité – centrales thermiques à gaz de nouvelle génération ou piles à combustible par exemple – plus décentralisée. Cette nouvelle génération d'économies d'énergie devrait contribuer de façon significative à la limitation globale de l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Le cas du nucléaire

Nous aborderons enfin le cas des centrales nucléaires. Leur impact sur l'environnement peut être classé en trois catégories bien distinctes :

- Un impact à l'échelle continentale lorsqu'un accident majeur, de type Tchernobyl, survient. Ce type d'accident, s'il s'explique par des problèmes techniques maintenant maîtrisés, ne pourra jamais être complètement éliminé. La probabilité d'occurrence d'un tel événement, même extrêmement faible, n'est pas la seule manière de mesurer la gravité de l'accident, car le nombre de personnes potentiellement impliquées peut être très grand. Notons cependant que ce risque d'accident grave existe aussi pour d'autres sources d'électricité, comme par exemple les ruptures de barrages hydrauliques qui peuvent être particulièrement meurtrières. Il est de la responsabilité collective de toute la Nation et de l'Europe, d'en assumer ou non les conséquences.

- Un impact plus local dû au rejet, accidentel ou contrôlé, de produits radioactifs dans le milieu environnant lors du fonctionnement normal des centrales nucléaires. Il est de la responsabilité des organismes de gestion des centrales et des agences de contrôle indépendantes au niveau national qu'aucun laisser-aller ne soit toléré dans ce domaine. Ce n'est peut-être pas toujours le cas. Cela implique aussi une information de la population locale dans un souci constant de transparence.

- Le traitement à long terme des déchets radioactifs. Il n'est pas du ressort de la conférence citoyenne de se prononcer sur la solution la plus adéquate. En revanche, le panel des citoyens considère qu'il n'est pas sain de construire une nouvelle génération de centrales nucléaires sans que le problème de la gestion des déchets nucléaires ne soit résolu, non seulement techniquement mais aussi socialement. C'est d'ailleurs une éthique qui devrait être respectée pour tout nouveau produit industriel : maîtriser son évolution dans le temps, de A à Z !

Le comportement des citoyens

La réflexion engagée par le panel des citoyens concernant le choix des sources d'énergie vise uniquement les besoins de consommation des secteurs tertiaire et résidentiel. Les secteurs de l'industrie et des transports nécessitent un traitement particulier et ont été délibérément exclus de son champ.

Cette partition manifeste la volonté d'appliquer une approche originale aux questions de l'utilisation des sources d'énergie. Il s'agit de se dégager du raisonnement global qui consiste à additionner la totalité des besoins pour les convertir en un chiffre total de « millions de tonnes équivalent pétrole » à l'échelle d'un pays. Par sa capacité à se rapprocher des citoyens et à s'adapter à leurs besoins, cette démarche ouvre des perspectives de choix diversifiés et d'actions innovantes.

Le principe d'une participation financière

L'implication personnelle et financière des citoyens est un important levier du changement, apte à favoriser le recours à de nouvelles sources d'énergie. Leur motivation dans ce domaine ne réside pas dans la crainte d'un tarissement des sources d'énergie fossiles actuelles – charbon, gaz, pétrole, uranium – mais relève plutôt de la volonté de les diversifier en développant les énergies renouvelables qui sont inépuisables.

Cette implication citoyenne peut être sollicitée individuellement et à l'échelon de la collectivité locale. Ainsi, il semble concevable d'encourager le citoyen à consentir un investissement financier personnel initial correspondant à plusieurs années de consommation pour s'équiper avec une source d'énergie renouvelable dont la mise en œuvre exige un apport pécunier plus lourd que le simple accès au réseau d'un opérateur. Des mesures économiques incitatives pourraient accompagner cette procédure couplant l'accession à la propriété d'une possibilité d'« accession à l'autonomie énergétique » à condition que celle-ci demeure facultative et choisie.

Une alternative consiste à financer l'investissement correspondant à un équipement utilisant une énergie renouvelable – quelques éoliennes ou des panneaux solaires par exemple – par l'intermédiaire des collectivités locales. Cet investissement serait alors remboursé, sous forme d'impôts locaux, par les habitants des communes concernées, en contrepartie de la fourniture d'électricité moins chère, voire gratuite. Ce dispositif doit être étudié au plus près pour ne pas être la source d'injustices : entre régions riches et régions pauvres notamment, pour lesquelles il faudrait imaginer des mécanismes de compensation.

Pour être acceptable par la population, il doit aussi s'appuyer sur une transparence des coûts permettant de disposer d'éléments objectifs de comparaison et donc de choix. Les citoyens doivent donc avoir accès à une information complète sur les coûts générés par la mise en œuvre de chaque source d'énergie avec une évaluation de ses impacts sur l'environnement. Nous y reviendrons plus loin.

Privilégier les solutions individuelles ou collectives ?

Le modèle actuel d'un réseau d'approvisionnement national doit-il perdurer et prévaloir comme mode principal et exemplaire pour toute fourniture d'électricité ? Cette question est au centre du débat puisqu'elle porte sur la capacité du citoyen à agir pour faire évoluer ce modèle centralisé. La réponse apportée par le panel des citoyens passe par une diversification des types de fourniture et de production d'électricité et surtout par leur adaptation à des besoins précis et spécifiques.

Quant aux échelles typiques des systèmes d'approvisionnement – du territoire national à l'espace de la commune en passant par les échelons régionaux et départementaux – il n'apparaît pas évident de calquer l'organisation de tels systèmes à ce découpage administratif. La notion de massif, à l'instar du bassin versant pour la gestion des ressources en eau, serait probablement mieux adaptée. Manifestement, le niveau local, celui de la commune ou du groupement de communes, constitue un point d'ancrage bien identifié de la réflexion et de la décision pour les citoyens. Il combine plusieurs avantages : un niveau de proximité pertinent pour le débat démocratique à l'échelle humaine, la connaissance des ressources nécessaires et disponibles et la capacité de décider et de mettre en œuvre leur exploitation. Cette réflexion au niveau local devant être nécessairement poursuivie au niveau départemental, régional et national voire européen.

Ainsi, il n'y a pas de réponse individualiste de la part du panel des citoyens, prônant l'installation généralisée de systèmes de production d'électricité dans chaque habitation.

La méfiance exprimée à l'encontre d'une production hyper-centralisée (celle des grosses centrales électriques par exemple) ouvre la voie à la prise en compte des ressources locales : vent, solaire, géothermie, bois... Il ne s'agit pas toutefois d'un point de vue dogmatique. La comparaison entre l'exploitation des ressources locales et l'accès aux services d'un réseau doit être réalisée sous tous ses aspects – mode d'exploitation, gamme de services, maintenance, garantie de continuité du service rendu...– pour satisfaire à certains critères d'exigence et permettre le choix de la solution la mieux adaptée. L'objectif de la démarche consiste bien à favoriser la diversification des sources d'énergie, à jouer sur leur complémentarité mais aussi sur la mutualisation des excédents de production générés par des installations décentralisées. Des micro-réseaux locaux peuvent parfaitement coexister avec les grands réseaux nationaux dont le développement est ainsi maîtrisé.

Par ailleurs, si le système de production peut être décentralisé, le contrôle du système d'exploitation relève, quant à lui, du service public. En effet, l'égalité d'accès des citoyens aux sources d'énergie exige une prise en compte globale : là encore, on peut imaginer des mesures compensatoires d'une région riche à une région pauvre pour garantir une égalité de traitement.

Enfin, il apparaît clairement que le choix citoyen n'est pas indépendant de l'attitude des décideurs. Pour devenir un interlocuteur à part entière dans le débat des choix de société, le citoyen doit pouvoir bénéficier d'une information à la fois approfondie et complète, reflétant la complexité de la question et la pluralité des approches. Émanant des experts, cette information doit aussi être présentée de manière particulièrement claire pour tous. Elle doit se plier à une formulation accessible aux non-spécialistes et adaptée aux questionnements spécifiques du citoyen-usager. C'est à cette condition que le débat public peut progresser, s'approfondir et renforcer la capacité du citoyen à opérer des choix et à les défendre devant les décideurs.

Le rôle attendu des pouvoirs publics

La situation particulière de l'Auvergne

Si l'on s'attache à examiner la situation de l'Auvergne au regard de son approvisionnement énergétique, on s'aperçoit que la région n'a pratiquement aucune autonomie ; elle est essentiellement importatrice. Hormis quelques installations de production hydroélectrique, l'Auvergne valorise peu d'autres sources d'énergie possibles et notamment le bois ou la géothermie.

La configuration socioéconomique du territoire est déterminante dans la situation de dépendance actuelle : quelques pôles urbains où se concentre une grande part de la consommation énergétique mais aussi un habitat rural très dispersé associant des bourgs, des petits villages et beaucoup de hameaux avec, dans certaines zones, un tissu de PME/PMI non négligeable. Il en ressort que le coût de l'énergie est sensiblement augmenté du fait du réseau de transport important que nécessite sa distribution sur l'ensemble du territoire.

Il convient donc d'étudier la diminution des coûts de transport de l'électri-

cité (notamment les lignes à très haute tension alimentant la région) en favorisant l'émergence de systèmes délocalisés de production électrique. L'objectif consiste à alimenter à un coût moindre la consommation des ménages pour un usage de proximité.

La vérité des coûts

D'énormes progrès ont été faits ces dernières années du point de vue de la rentabilité économique des différentes sources d'électricité. Et il est fort à parier que des progrès au moins aussi importants seront observés dans les dix prochaines années. Notre propos n'est pas ici de définir, au centime près, le coût du kWh de telle ou telle source d'électricité, mais plutôt de faire ressortir les grandes tendances.

Pour beaucoup de sources d'électricité étudiées lors de cette conférence, la rentabilité économique est maintenant prouvée ou sur le point de l'être. Cela est dû en particulier à la production industrielle à grande échelle de ces sources. C'est le cas typique des éoliennes. De même, les chaudières à bois, les pompes à chaleur géothermales, ou les centrales à gaz, appartiennent aussi à cette catégorie.

La production d'électricité par centrale nucléaire est actuellement la plus compétitive, avec des nuances cependant. Cette production, centralisée par nature, exige le développement des lignes à très haute tension afin de couvrir l'ensemble du territoire français. Ces lignes ont un coût non négligeable, qui doit aussi être pris en compte pour juger de la pertinence économique de cette source d'électricité. Enfin, le coût réel de démantèlement et de traitement ultime des déchets nucléaires ne peut, par définition, être encore fixé avec précision. Il induit donc aussi une incertitude sur le coût réel du kWh d'origine nucléaire. Même si ces dépenses sont significatives en valeur absolue, elles restent limitées lorsqu'on les ramène au kWh produit, du fait de l'énorme quantité d'électricité produite par l'ensemble des centrales nucléaires françaises.

Le souhait d'intégrer les coûts externes liés à la production ou à la consommation d'énergie répond à une préoccupation réelle des citoyens. Ils constatent la difficulté de procéder à des comparaisons entre les différents systèmes économiques selon la nature des sources d'énergie auxquelles ils se rapportent. Les informations actuellement disponibles ne prennent pas en compte des réalités comparables parce qu'elles n'intègrent pas les mêmes données de départ. Ils aimeraient pouvoir disposer de bilans comparatifs des coûts définis à l'échelle d'une habitation, d'un petit collectif, etc., et établis à partir de différentes sources d'énergie. Cette question est au cœur d'enjeux contradictoires à la fois sur le plan politique, sur le plan technique et sur le plan économique.

Cette information est actuellement souvent biaisée par les lobbies, d'où la nécessité d'un arbitrage par la puissance publique afin de pouvoir disposer d'un véritable outil d'aide à la décision en matière de choix énergétique. Cet outil doit être fondé sur une plate-forme commune à partir de laquelle pourrait être construite une méthode de travail et une grille fiable permettant d'évaluer ces coûts et leur évolution en fonction de différents scénarios. Cet outil serait d'abord utile sur le plan individuel pour choisir, en toute connaissance, le chauffage de sa maison ou de son immeuble, mais aussi sur le plan local pour envisager par exemple l'équipement d'une commune ou d'un quartier, et enfin au niveau national. C'est alors que pourraient s'opérer ou non les choix de financement des énergies alternatives au vu de ce qui convient le mieux à des échelles précises. Les critères de décision reposeraient alors non plus sur la force d'une stratégie de communication mais sur des informations fiables.

Pour cela, il faut aussi prendre en compte les caractéristiques locales : taux de pollution, coût de son traitement, prix de l'énergie, de son transport, sans oublier bien sûr son impact sur l'emploi local, pour cesser de fonctionner sur un modèle unique, transférable partout et adaptable nulle part.

Le développement des sources d'électricité nouvelles ?

Les investissements à mettre en œuvre pour chaque source d'électricité sont souvent énormes. C'est probablement ce qui limite l'utilisation à grande échelle de certaines d'entre elles. Des procédures originales devront être trouvées dans le futur pour pallier ce problème.

Si les investissements pour les centrales à gaz, ou les chaudières à bois, restent relativement faibles, il n'en est pas de même pour les centrales nucléaires et les éoliennes, à quantité d'électricité produite égale. Si une structure centralisatrice a été trouvée par le passé pour gérer les investissements des centrales nucléaires, il n'existe actuellement pas encore de solution adéquate pour gérer les investissements propres à l'installation de fermes éoliennes par exemple. Ces structures sont probablement à rechercher à un niveau plus local (régional voire départemental). Il nous paraît essentiel de mettre en place de telles structures pour que le développement de ces énergies nouvelles puisse s'engager sur le long terme.

Lorsque les investissements sont trop lourds, et c'est le cas actuellement pour les panneaux solaires photovoltaïques ou les piles à combustible, il est nécessaire de se concentrer en premier lieu sur un effort important et cohérent de recherche et développement (R&D). C'est la condition sine qua non pour parvenir à un développement durable, et économiquement rentable à long terme. Un développement forcé et prématuré, à coup de subventions, n'est probablement pas judicieux et s'avérerait contre-productif. A une échelle moindre, le précédent des subventions ponctuelles attribuées sans réel suivi au chauffage solaire thermique dans les années 80 doit être médité.

Le panel considère comme indispensable un développement vigoureux de la recherche pour faciliter l'essor des énergies nouvelles. Cela exige une volonté politique forte qui s'exprime dans les budgets dévolus à la recherche et dans la promotion massive des nouveaux équipements, afin de faire baisser les prix et donc de faciliter l'accès au plus grand nombre. Cet effort vigoureux de R&D doit aussi concerner le stockage de l'énergie. Ce problème est une limitation intrinsèque pour le développement des sources d'électricité intermittentes. Sa solution permettrait d'ailleurs aussi de pouvoir gérer au mieux les pics de consommation d'électricité, en hiver notamment.

Un développement harmonieux des sources d'électricité nouvelles suppose aussi qu'il faille leur garantir un prix de vente juste, et faciliter le rachat par de gros opérateurs de distribution d'électricité des excédents produits par les particuliers.

Ces dispositifs devront être gérés de façon très souple en évitant les structures trop lourdes ou la création d'une énième structure qui se surajouterait à ce qui existe déjà. Si l'évocation d'un service public de l'énergie n'est pas totalement écartée, c'est à condition qu'il ne soit pas monolithique, ni dans sa structure ni dans ses missions, mais qu'il soit ouvert au débat démocratique. Il faut aussi qu'il soit à même d'articuler les problématiques régionales et nationales à celles de l'Europe.

Dans le cadre de cette réflexion, le panel suggère la création d'un CEA, « Commissariat aux énergies alternatives » qui pourrait coordonner la politique mise en œuvre par les pouvoirs publics en matière de :

- recherche et développement sur les nouvelles énergies,

- incitation aux équipements,

- information systématique des citoyens et des décideurs politiques et économiques.

Vers une prise de conscience collective

Le panel des citoyens souligne que l'attractivité d'une région est largement déterminée par les initiatives et les équipements qui lui garantissent une qualité de vie dans le travail et dans les loisirs. L'exemple du fonds spécial énergie créé par la région Rhône-Alpes[1] est édifiant à cet égard.

On connaît aujourd'hui ses effets positifs sur de nombreux fabricants qui ont choisi d'implanter leurs activités sur ce territoire. Ce fonds a entraîné le développement d'entreprises locales spécialisées dans l'installation et la maintenance des équipements liés à ces nouveaux choix énergétiques. Cela prouve que l'encouragement à la diversification représente une source de développement régional. Alors pourquoi ne pas transférer ce type d'initiative en Auvergne ?

L'Auvergne ne pourrait-elle pas constituer un territoire pertinent d'expérimentation dans le cadre de la politique d'aménagement du Massif central ? Cela pourrait se traduire par l'expérimentation de nouvelles technologies et des équipements innovants, sans doute encore coûteux, mais qui pourraient être réduits par des aides volontaristes à l'investissement.

Sur un plan collectif, mais à moindre échelle, le panel des citoyens préconise de développer le diagnostic d'économies d'énergie dans les institutions, les entreprises et les grands établissements de façon générale. Cela signifie assurer la formation de nouveaux professionnels spécialisés sur de l'« éco-conseil ». De plus, une politique d'incitation basée sur des aides financières plafonnées en fonction de la hauteur des dépenses à prévoir pourrait accompagner utilement les efforts d'économies engagés par les entreprises mais aussi par les particuliers. Des mesures fiscales devraient encourager la création d'équipements favorisant les économies d'énergie mais en laissant le choix des moyens techniques pour y parvenir. De telles initiatives existent déjà. Elles doivent être soutenues par une action plus volontariste.

Fort de l'expérience vécue lors de cette conférence citoyenne, le panel des citoyens insiste sur la nécessité, pour les pouvoirs publics, de fonder leurs initiatives sur l'affichage d'une volonté clairement inscrite dans la démocratie participative. Quantité de mesures peuvent être arrêtées, mais pour qu'elles aient un effet durable et sensible, elles doivent être acceptées et spontanément relayées par les citoyens.

Il considère enfin que le niveau d'intervention le plus efficace est celui qui est le plus proche des citoyens : communes, communautés de communes ou agglomérations, avec le risque de réalisations peut-être plus modestes mais certainement plus efficaces parce que mieux adaptées aux contraintes locales.

Ces réflexions du panel des citoyens ne constituent pas une fin en soi. Elles ont mis en évidence certaines lignes directrices fortes : diversification des sources d'approvisionnement en énergie ; réflexion différentiée suivant les échelles d'utilisation de ces énergies ; enfin décentralisation des décisions. Elles doivent se poursuivre, et s'approfondir, pour arriver à une mise en œuvre harmonieuse dans le cadre d'un aménagement du territoire bien compris.

1 Ce fonds permet notamment d'aider les entreprises à investir dans des équipements pour de nouveaux choix énergétiques.

Annexe : fiches « énergies »

Les fiches « énergies » répertorient un certain nombre de données qu'il est utile de connaître. Les conventions utilisées sont rassemblées ci-dessous.

Unité d'habitation rurale

Le type d'Unité d'habitation rurale (UHR) est un bourg de 1 000 habitants, sans grosse unité industrielle. Cela correspond, par exemple, au bourg de Rochefort-Montagne dans le Puy-de-Dôme. La consommation totale d'électricité par année est estimée à 4 GWh se répartissant ainsi :

chauffage :	0,9 GWh
eau chaude :	0,7 GWh
électricité spécifique :	2,4 GWh

Unité d'habitation urbaine

Le type d'Unité d'habitation urbaine (UHU) est une agglomération de 250 000 habitants. Cela correspond, par exemple, à l'agglomération de Clermont-Ferrand. La consommation totale d'électricité par année est estimée à 1,6 TWh soit environ 1/4 de réacteur nucléaire standard équivalent. Elle se répartie comme suit :

Secteur industriel :	600 GWh
Secteur résidentiel et tertiaire :	1000 GWh
dont : chauffage :	220 GWh
eau chaude :	180 GWh
électricité spécifique :	600 GWh

Grandes agglomérations

La couverture des besoins en électricité des grandes agglomérations françaises nécessite une production centralisée d'électricité. Elle est estimée en considérant les agglomérations, et grandes villes environnantes, qui permettent d'atteindre une population d'environ 1 million d'habitants ou plus :

Paris	10 RNSE
Lyon	2 RNSE
Marseille	2 RNSE
Lille	2 RNSE
Bordeaux	1 RNSE
Toulouse	1 RNSE
Nice et environs	1 RNSE
Nantes et environs	1 RNSE
Strasbourg et environs	1 RNSE
Rouen et environs	1 RNSE

Soit un total de 22 réacteurs nucléaires standards équivalents pour couvrir ces besoins.

Occupation des sols

Nous avons utilisé les données suivantes en vigueur actuellement ou dans un proche avenir.

Énergie éolienne : 8 MW/km^2 pour une ferme d'éolienne, et pour une utilisation pendant 3 000 heures par année (disponibilité de 35 %) dans un site judicieusement choisi. Cela correspond à la surface qu'il faut réserver pour implanter les éoliennes. Seulement 2 % au maximum de cet espace est physiquement occupé par les éoliennes, le reste pouvant par exemple être cultivé (pour une installation terrestre seulement). Pour quelques éoliennes seulement, l'occupation totale au sol est de l'ordre d'un demi-hectare par éolienne, pour une occupation réelle négligeable.

Énergie solaire : 150 MW/km^2 pour une utilisation pendant 1 500 heures par année dans une région comme l'Auvergne (disponibilité de 17 %).

Energie nucléaire : 1 000 MW/km^2 pour une utilisation pendant 7 000 heures par année (disponibilité de 80 %). Si l'on prend en compte la superficie qu'il faut réserver pour l'acheminement du courant par des lignes de très haute tension, la surface effectivement utilisée est plus grande. Pour l'estimer, dans le cas de l'Auvergne, il faut une ligne à très haute tension de 200 km depuis la centrale de Belleville (centrale la plus proche). Pour un corridor de 50 mètres de large, cela correspond à une surface de 10 km^2. Sur cette surface, nous supposons que 2 % seulement est physiquement occupé par les pylônes, le reste pouvant être cultivé.

Centrale à gaz : nous prenons les mêmes conditions qu'une centrale nucléaire, soit 1 000 MW/km^2 pour une utilisation pendant 7 000 heures par année (disponibilité de 80 %). Dans ce cas cependant, nous ne tenons pas compte de l'espace pris par l'acheminement par ligne à très haute tension puisque ces centrales de tailles plus flexibles peuvent être implantées très près d'une unité d'habitation urbaine, par exemple.

Coûts et investissements

Le coût de production de l'électricité se mesure traditionnellement en euros (ou francs), par kWh. L'échelle de référence que nous avons choisie est déterminée par le prix payé par un particulier, sans tarif préférentiel, soit environ 10 centimes d'euros (65 centimes de francs) par kWh. Les coûts de

l'électricité produite par les différentes sources sont indiqués dans cette unité : le prix public/kWh.

Ce coût inclut le coût du combustible mais aussi le coût correspondant à l'amortissement de l'investissement nécessaire à la production de l'électricité, et au démantèlement complet des centrales, si nécessaire. Cette partie dépend bien sûr de la durée de l'amortissement choisie, c'est pourquoi elle peut fluctuer d'une estimation à l'autre.

Nous avons donc indiqué, dans les fiches, les grandes tendances de ces coûts. Sauf indications contraires, ils correspondent aux coûts actuels, et pourraient donc évoluer significativement selon les efforts de recherche et développement mis en œuvre dans les années à venir. Ces coûts correspondent aux coûts internes de production de l'électricité. Ils n'incluent pas le coût du transport et de la distribution, ni les coûts externes.

L'investissement nécessaire à la construction d'une source donnée d'électricité dépend de la puissance installée et non pas de l'énergie produite. Il se mesure traditionnellement en millions d'euros (ou de francs) par MégaWatts installés. Conformément à notre choix d'unités d'habitation, nous avons traduit ces investissements en investissements nécessaires pour couvrir les besoins énergétiques d'une Unité d'habitation urbaine (UHU), et d'une Unité d'habitation rurale (UHR). Les investissements de référence choisis sont : 1,2 M€/MW (8 MF/MW) pour l'énergie éolienne, 3 M€/MW (20 MF/MW) pour l'énergie solaire, 1 M€/MW (6,5 MF/MW) pour l'énergie nucléaire, et 0,5 M€/MW (3,2 MF/MW) pour les centrales à gaz à cycle combiné. Ces coûts s'entendent pour une installation à grande échelle (réduction significative des coûts) et pour une installation à moyen terme en ce qui concerne l'énergie solaire.

Tableau récapitulatif 1 - Coûts et investissements

	Nucléaire	Char., gaz,.	Eolien	Solaire
Coût de revient				
En prix public/kWh	1/3	1/3 à 1/2	1/3 à 1/2	3 à 5
Investissement				
pour une UHR	0,6 M€ (3,7 MF)	0,3 M€) (1,8 MF)	1,6 M€ (10 MF)	8 M€ (50 MF)
pour une UHU	220 M€ (1 500 MF)	110 M€ (700 MF)	650 M€ (4 000 MF)	3200 M€ (20 000 MF)
Lignes de transport				
pour une UHR		2,2 M€ (15 MF)		
pour une UHU		350 M€ (2 000 MF)		

Les coûts pour l'énergie solaire et l'énergie éolienne supposent que l'électricité produite soit distribuée sur le réseau électrique et non pas stockée. Le coût de l'électricité produite par centrale nucléaire inclut une estimation du coût de démantèlement et de traitement des déchets, selon les statistiques de l'EDF. Il est généralement admis que le coût de l'électricité produite par panneaux solaires photovoltaïques devrait baisser largement dans les années à venir. Un coût de 1,5 prix public/kWh pourrait être atteint dans les années 2010-2015. Les investissements en ligne de transport de l'électricité sont estimés sur la base de 1 500 €/kW (10 000F/kW) en milieu urbain et 4 000 €/kW (25 000F/kW) en milieu rural (d'après B. Dessus), pour une utilisation moyenne pendant 7 000 heures. Nous n'avons pas mentionné dans ce tableau le cas de l'électricité produite par centrales hydrauliques dans la mesure ou les capacités de production, tout au moins pour les grands barrages, sont quasiment toutes utilisées. Le cas des petites centrales hydrauliques est traité dans le texte.

Tableau récapitulatif 2 - Occupation des sols

	Nucléaire sans transp.	Nucléaire avec transp.	Char., gaz	Eolien occ. maxi	Eolien occ. réelle	Solaire
UHR	500 m²	-	500 m²	1 ha	–0	2 ha
UHU	0 ha	40 ha	20 ha	7000 ha	140 ha	700 ha

La colonne « sans transp. » correspond à l'occupation de la centrale elle-même, celle « avec transp » inclut l'estimation de l'emprise au sol due aux lignes à très haute tension. Cette emprise n'est significative que pour une habitation urbaine, dans la mesure où il existe une arrivée unique de la ligne à très haute tension au niveau de ce type d'habitation. L'électricité est ensuite véhiculée par toute la toile d'araignée, de toute façon indispensable, des lignes à basses et moyennes tensions dans toutes les habitations rurales. La colonne « occ. maxi » correspond à la surface au sol nécessaire à l'implantation des éoliennes, celle « occ. réelle » correspond à la surface non utilisable (non cultivable en particulier), pour une implantation terrestre des éoliennes. L'occupation des sols indiquée pour l'énergie solaire, en panneaux photovoltaïques, doit être comparée à la superficie des toits disponibles dans les deux types d'unité d'habitation retenus. Ainsi, la superficie de toits d'une UHR est de l'ordre de 1 à 2 ha.

Charbon / gaz / fuel

Principe de fonctionnement

Centrale de type thermique. Production de chaleur par combustion de charbon, fuel ou gaz. La transformation de cette chaleur en électricité se fait selon le cycle de Carnot. Le fonctionnement en cogénération permet d'augmenter le rendement.

Réserves (au niveau du combustible)

Ressources géologiques jugées exploitables sur les bases techniques et économiques du moment, avec le taux de consommation actuel, et compte tenu des gisements connus :

charbon	> 200 ans
fuel et gaz	> 50 ans

Puissance, disponibilité et rendement

Une vingtaine de centrales existent, d'une puissance de 125 à 700 MW.

- Production électrique totale :

charbon :	30 TWh
fuel :	5 TWh
gaz :	5 TWh
divers :	5 TWh

soit une production totale d'environ 7 RNSE

- Disponibilité maximale : 80 % et utilisation moyenne : 20 %.
- Rendement de 35 % en fonctionnement standard. Il peut atteindre 50 % en fonctionnement en cycle combiné. En fonctionnement en cogénération, le rendement s'élève à 85 %.

Coûts et investissements

- Coût de production moyen : 1/3 à 1/2 prix public / kWh en fonctionnement standard.
- Investissement (centrale à gaz à cycle combiné) :

pour une UHR : 0,3 M € (1,8 MF)
pour une UHU : 110 M€ (700 MF)

Risques écologiques et sanitaires

- Quantité de CO_2 rejetée dans l'atmosphère, par RNSE, pour une centrale classique :
  charbon : 7 millions de tonnes
  fuel : 5 millions de tonnes
  gaz : 3,5 millions de tonnes

Pour une centrale à gaz à cycle combiné, la quantité de gaz carbonique rejetée dans l'atmosphère est de 2,5 millions de tonnes environ par RNSE.

- Accidents mines de charbon / extraction et acheminement gaz.

Occupation des sols

500 m² par UHR, 20 ha par UHU

Remarques

Cette production classique représente 60 % de la production électrique dans le monde et 10 % en France. Il n'existe aucune centrale thermique raccordée au réseau EDF en Auvergne.

Énergie nucléaire

Principe de fonctionnement

Centrale de type thermique. Chaque réacteur nucléaire est composé d'un cœur à combustible nucléaire produisant de la chaleur. La transformation de cette chaleur en électricité se fait sur le même principe qu'une centrale thermique classique à charbon ou à gaz (cycle de Carnot).

Réserves (au niveau du combustible)

Ressources géologiques jugées exploitables sur les bases techniques et économiques du moment : > 400 ans avec le taux de consommation actuel.

Puissance, disponibilité et rendement

Chaque centrale est composée de deux à quatre réacteurs, d'une puissance de 900, 1 300 ou 1 450 MW chacun. Il existe actuellement en France une soixantaine de réacteurs nucléaires, répartis sur une vingtaine de sites. La production électrique totale correspond à 56 RNSE.

Disponibilité et utilisation moyenne : 80 %. Rendement de 35 % en fonctionnement standard.

Coûts et investissements

Coût de production : 1/3 prix public/kWh.

Investissement :
pour une UHR : 0,3 M€ (3 MF)
pour une UHU : 250 M€ (1.200 MF)

Risques écologiques et sanitaires

- Contaminations diverses, déchets radio actifs.
- Accidents nucléaires (fonte du cœur à Tchernobyl) : décès par irradiation directe, cancers en excès attendus, malformations à la naissance en excès attendues

Occupation des sols

- Sans tenir compte du transport : 500 m^2 pour une UHR, 20 ha pour une UHU.
- En tenant compte du transport : 140 ha pour une UHU.

Remarque

La production d'électricité d'origine nucléaire représente 20 % de la production électrique dans le monde et 75 % en France.

Il n'existe aucune centrale nucléaire en Auvergne.

La centrale la plus vieille actuellement en activité date de 1978. Un réacteur est en construction à Civaux (Vienne). La durée de vie d'une centrale, initialement prévue de 30 ans, est actuellement estimée à 40 ans ou même plus. A partir de 2020, il y aura environ 40 centrales déclassées.

Énergie hydraulique

Principe de fonctionnement

- Centrale de haute chute : lac de retenue (naturel ou artificiel) ; conduite forcée ; turbine. Un lac de réception doit être prévu pour les centrales STEP (remontée d'eau pour le stockage de l'électricité en heures creuses).
- Centrale au fil de l'eau : centrale installée directement sur le fil du cours d'eau, lorsque le débit est suffisamment important.

Réserves (au niveau exploitation)

- Potentiel maximal exploitable : 100 TWh/an.
- Potentiel exploité : 80 TWh/an soit environ 11 RNSE.

Puissance, disponibilité et rendement

- Grandes centrales : quelques centaines de MW, mini-centrales : quelques centaines de kW, micro-centrales : quelques dizaines de kW.
- La disponibilité maximale dépend beaucoup des conditions de pluviosité. L'utilisation moyenne est d'environ 40 % pour les grandes centrales.
- Rendement de 80 %.

Coûts et investissements

- Coût de production :

grande centrale : 1/5 prix public/kWh

mini et micro-centrale : 1/2 prix public/kWh

Risques écologiques et sanitaires

- Déplacement de populations des vallées inondées, risques de rupture de barrage et d'inondation des vallées pour les grands barrages.
- Rupture de l'équilibre écologique en aval et en amont, et modification de micro-climats locaux.

Remarques

La production d'électricité d'origine hydraulique représente 20 % de la production d'électricité dans le monde et 15 % en France.

Le potentiel exploité en France représente 90 % du potentiel économiquement exploitable. La puissance totale installée en France correspond à 18 000 MW environ. La puissance installée en mini et micro-centrales correspond à environ 1 000 MW (l'équivalent d'un RNSE). Environ 1 000 MW pourraient encore être installés.

En Auvergne (et départements limitrophes), la production annuelle d'électricité d'origine hydraulique s'élève à environ 2 TWh.

Autre type de centrale : centrale marémotrice de la Rance.
puissance : 240 MW
production électrique : 1/10 de RNSE
coût de production : 1 prix public/kWh

Filière bois-énergie

Principe de fonctionnement

- Centrales thermiques classiques alimentées en bois, pour produire de l'électricité et de la chaleur en cogénération.
- Chaudières individuelles ou industrielles avec bois en plaquettes alimentées automatiquement, pour le chauffage.

Réserves (au niveau exploitation)

La moitié seulement des déchets de la filière bois sont actuellement valorisés.

Puissance, disponibilité et rendement

Chaudières industrielles de 2 MW. La disponibilité est proche de 100 %. Rendement de 35 % en fonctionnement classique.

Coûts et investissements

- Coût de production de l'ordre de 1/2 à 1 prix public/kWh
- Investissement de 0,2 M€ (1,3 MF) pour une UHR, et 80 M€ (500 MF) pour une UHU.

Risques écologiques et sanitaires

Rejet de gaz à effet de serre, comme le gaz carbonique. La même quantité de ce gaz est cependant absorbée (mais pas obligatoirement au même endroit ni au même moment) lors de la croissance des forêts.

Remarques

Les chaudières à bois sont essentiellement utilisées pour valoriser les déchets industriels de la filière bois. C'est particulièrement intéressant car cela évite les frais de transport et de mise en décharge de ces déchets, tout en produisant de la chaleur.

Le chauffage domestique au bois représente plus de 90 % des consommations énergétiques de tous types de bois.

L'émergence de filières d'approvisionnement devrait permettre un développement accru des opérations dans le secteur des collectivités locales.

Énergie éolienne

Principe de fonctionnement

Colonne de 30 à 100 m de hauteur, comportant deux ou trois pales de 5 à 90 m de diamètre, orientables.

Réserves (au niveau exploitation)

• Potentiel économiquement exploitable en France : 70 TWh sur terre (10 RNSE), 100 TWh au large des côtes (15 RNSE)

• Potentiel exploité en France : 1/100 d'un RNSE

Puissance, disponibilité et rendement

• Éoliennes de puissance : de quelques centaines de kW à 1 ou 2 MW. Éoliennes privées de quelques kW.

• La disponibilité dépend évidemment beaucoup des conditions de vent. Elle peut être estimée à 35 % dans des sites favorables. Rendement de l'ordre de 30 %.

Coûts et investissements

• Coût de production

Sité éloigné de tout réseau : 1 à 1,5 prix public/kWh comprend batteries et convertisseurs
Site raccordé : 1/3 à 1/2 prix public/kWh
Rachat de l'électricité par EDF entre 1/2 et 1 prix public/kWh

• Investissement:

pour une UHR : 1,6 M € (10 MF)
pour une UHU : 650 M€ (4 000 MF)

Risques écologiques et sanitaires

• Pollution sonore et visuelle ; risques pour les oiseaux.

• Risques sanitaires négligeables.

Occupation des sols

• Emprise totale : 1 ha pour une UHR (2 éoliennes de 0,7 MW) ; 7 000 ha pour une UHU (350 éoliennes de 1,5 MW)

• Emprise non cultivable : négligeable pour une UHR ; 140 ha pour une UHU

Remarques

La production d'électricité d'origine éolienne représente 0,01% de la production électrique en France. La puissance actuellement installée en France est de l'ordre de 40 MW. Le projet Eole 2005 prévoit l'installation de 250 à 500 MW d'ici 2005.

En Allemagne 4 500 MW sont installés, et au Danemark, 1 800 MW. Le taux de croisssance de la puissance installée est actuellement de 40 % par an.

Énergie solaire

Principe de fonctionnement

• Solaire thermique : chauffe-eau solaire ou plancher chauffant par circulation d'eau dans des capteurs solaires.

• Solaire photovoltaïque : production directe d'électricité par panneaux solaires composés de cellules (dites photovoltaïques) au silicium.

• Solaire thermodynamique : centrales thermiques utilisant le rayonnement solaire concentré dans une chaudière centrale par un ensemble de panneaux réfléchissant.

• Solaire passif : architecture bioclimatique.

Réserves (au niveau exploitation)

Pratiquement infinies par rapport aux besoins mondiaux.

Puissance, disponibilité et rendement

• Solaire thermique : environ 50 % des besoins d'eau chaude individuels, de 40 à 60 % des besoins en chauffage.

• Solaire photovoltaïque : panneaux délivrant environ 150 W par m^2.

• Solaire thermodynamique : centrales de quelques MW soit quelques GWh/an de production d'électricité.

• La disponibilité varie de 15 % au nord de la France, à un peu plus de 20 % au sud.

• Le rendement actuel des panneaux photovoltaïques varie entre 10 et 15 %.

Coûts et investissements

• Coût de production actuel : 3 à 5 prix publics/kWh

• Investissement :

pour une UHR : 8 M€ (50 MF)

pour une UHU : 3 200 M€ (20 000 MF)

Risques écologiques et sanitaires

• Pollution visuelle éventuelle.

• Risques sanitaires négligeables, risques de pollution chimique au niveau de la fabrication des composants (silicium).

Occupation des sols

pour une UHR : 2 ha
pour une UHU : 700 ha

Remarques

La production d'électricité d'origine solaire est pratiquement nulle en France. Elle correspond à 1/1000 de RNSE. Un certain nombre de chauffe-eau et chauffage solaire existe, dont 300 environ en Auvergne. Il n'existe plus de centrale solaire thermodynamique en France. La première (Thémis) avait une puissance de 2 MW et les panneaux recouvraient une surface de 5 ha. Le projet Hélios 2006 prévoit des subventions publiques pour l'installation de chauffe-eau et chauffage solaire.

Géothermie

Principe de fonctionnement

• Haute température (HT, de 150° à 350°) : par forage, on extrait du sol de la vapeur sèche ou humide qui, en actionnant une turbine, peut produire de l'électricité.

• Moyenne température (MT, de 90° à 150°) : le fluide géothermal transfère sa chaleur à un fluide secondaire qui se vaporise et actionne une turbine.

• Basse et très basse température (BT, de 50° à 90° et TBT, moins de 50°) : le fluide géothermal est directement utilisé pour le chauffage urbain ou le chauffage individuel, à l'aide d'une pompe à chaleur.

Réserves (au niveau exploitation)

• HT et MT : seulement quelques sites en France (DOM-TOM).

• TBT : développements possibles à peu près partout en France, et notamment dans les bassins sédimentaires (Bassin parisien, Alsace, Auvergne).

Puissance, disponibilité et rendement

• HT : 4,5 MW sont installés en Guadeloupe pour produire de l'électricité, 9 000 MW dans le monde.

• MT : Installations de faibles puissances en France

• BT : 250 MW thermiques installés dans la région parisienne.

• TBT : équipement progressif de maisons individuelles avec pompes à chaleur.

La disponibilité pourrait atteindre 80 %.

Coûts et investissements

Les coûts de production des différentes filières devraient être compétitifs par rapport aux coûts de production des centrales thermiques classiques.

Risques écologiques et sanitaires

Quasi nuls.

Remarques

Essentiellement utilisable pour le chauffage urbain en MT et BT, et le chauffage individuel en TBT. Utilisable aussi pour l'horticulture et la pisciculture. La maîtrise des technologies récentes (notamment pour lutter contre la corrosion et l'entartrage dus à l'eau), et la banalisation des forages, devraient permettre un regain d'activité dans ce domaine.

L'utilisation en chauffage individuel avec pompe à chaleur permet aussi de fonctionner comme refroidisseur l'été, les calories étant cette fois-ci restituées à la terre.

Pile à combustible

Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne comme une pile standard si ce n'est qu'elle est alimentée en permanence par un combustible plutôt que d'être entièrement hermétique. Le carburant idéal est de l'hydrogène qui, avec l'oxygène présent dans l'air, permet de produire l'électricité en rejetant tout simplement de l'eau. Plusieurs filières existent : piles à basse température qui produisent uniquement de l'électricité (pour les voitures électriques par exemple), ou les piles à moyenne et haute température qui produisent, en plus de l'électricité, de la chaleur. Ces piles sont alors utilisées pour alimenter, en électricité et en chauffage, des habitations collectives ou même individuelles (cogénération).

Réserves (au niveau combustible)

Infinies si le carburant est de l'hydrogène. Les mêmes que les combustibles fossiles si le combustible est le gaz naturel par exemple.

Puissances, disponibilité et rendement

- Gamme extrêmement variée, de la pile pour téléphone portable (en projet) ou pour voitures électriques jusqu'à la pile de quelques MW pour alimenter des logements collectifs, ou de quelques kW pour les maisons individuelles.
- La disponibilité est proche de 100 %.
- Le rendement est variable selon le type de piles. Il peut atteindre 80 %.

Coûts et investissements

- Le coût de production est encore très élevé, car la production est actuellement très limitée. Un coût de 1/2 à 1 prix public/kWh est attendu dans les cinq années à venir.
- L'investissement est actuellement de l'ordre de 1,2 M€ (8 MF) pour une UHR et 500 M€ (3 200 MF) pour une UHU. Une réduction par deux est attendue dans les cinq années à venir.

Risques écologiques et sanitaires

- Pollution chimique due aux composants internes de la pile.
- Rejet de gaz carbonique si le carburant utilisé est du gaz naturel par exemple.

Remarques

Les piles à combustible sont connues depuis les années 60. Elles étaient alors utilisées dans l'aéronautique. Elles connaissent actuellement un très fort développement dû à un programme de recherche et développement intense, en France et dans le monde (voiture électrique, électricité et chauffage collectif et individuel).

Glossaire

Définitions et unités

Unités

Les multiples des unités d'énergie ou de puissance sont souvent dénommés avec les préfixes suivant :

kilo (k) = mille -
Méga (M) = million de -
Giga (G) = milliard de -
Téra (T) = mille milliards de -

Énergie

La quantité d'énergie (produite ou consommée) se mesure le plus souvent en kilo-Watt-heure (kWh) et ses multiples, ou encore en tonne-équivalent-pétrole (tep). L'équivalence entre kWh et tep est fondée sur le contenu calorifique de chaque source d'électricité. Ainsi, une façon de comptabiliser les kWh est de retenir le contenu calorifique des combustibles qui auraient été nécessaires à leur production. Cette équivalence dépend alors du mode de production de l'électricité, et de son rendement. Une tep équivaut ainsi à 4 500 kWh lorsqu'elle est utilisée pour produire de l'électricité dans une centrale thermique classique (avec un rendement de 35 % environ). Cela correspond au taux de conversion généralement admis dans les statistiques officielles.

On utilisera aussi comme unité d'énergie l'énergie produite par un réacteur nucléaire d'une puissance de 1 000 MW pendant un an, avec une disponibilité de 80 %, soit 7 TWh. L'unité sera alors appelée le réacteur nucléaire standard équivalent (RNSE). Avec l'équivalence indiquée ci-dessus, 1 RNSE correspond donc à une consommation d'environ 1,5 Mtep. Si cette électricité est produite dans une centrale à gaz à cycle combiné, de rendement 50 %, 1 RNSE correspond alors à 1 Mtep, et 0,3 Mtep sont encore récupérables en principe sous forme de chaleur si la centrale est utilisée en cogénération.

Puissance

La puissance est la quantité d'énergie consommée, ou produite, par seconde. Elle se mesure en Watt (W). Une ampoule d'une puissance de 100 W allumée pendant 10 heures consomme ainsi une énergie de 100 x 10 = 1 000 Wh = 1 kWh.

Considérations économiques

Microéconomie et macroéconomie

La microéconomie est l'explication des phénomènes économiques à partir du comportement des agents économiques que sont les producteurs, les consommateurs, les épargnants... Cette approche met l'accent sur les choix individuels.

La macroéconomie est l'explication des phénomènes économiques à partir des relations entre les agrégats (produit intérieur brut ou PIB, masse monétaire, importation/exportation...) qui caractérisent une économie nationale. Cette approche s'appuie sur des modèles alimentés par la comptabilité nationale et testés par des méthodes économétriques. Elle vise à rendre plus efficace la politique économique : émission monétaire, taux de change, régulation budgétaire...

Investissement

Investir consiste à augmenter le stock des moyens de production (machines par exemple) pour produire plus, ou moins cher, dans le futur. L'investissement est incorporé dans les coûts de production par le biais de l'amortissement.

Un investissement de 1 500 € (10 000F) par kW, amorti sur 10 ans, avec une utilisation en continu (environ 8 500 heures), contribue pour 1,5 centimes d'euros (10 centimes) dans le coût de production du kWh, avec un taux d'actualisation nul.

Valeur à prix courants ou constants

L'une des principales conséquences de l'inflation est de diminuer le pouvoir d'achat de la monnaie. Pour éliminer ce biais dans le calcul économique, on raisonne en euro ou en franc à prix constant. La valeur en euro ou en franc courant quant à elle est celle définie à un instant donné.

Une valeur en euro (franc) constant est donc égale à celle en euro (franc) courant corrigée de l'inflation.

Taux d'actualisation ou valeur actuelle

Même en prix constants, la valeur actuelle d'une unité monétaire disponible dans le futur est inférieure à celle de la même unité disponible aujourd'hui (« un tiens vaut mieux que deux tu l'auras »). Le taux d'actualisation correspond au taux de rentabilité interne des investisseurs privés ou à une recommandation du Plan (en France ce dernier a longtemps recommandé 8 %).

Le choix de ce taux exerce une grande influence sur les choix techniques car plus il est élevé moins est grande la rentabilité des investissements lourds en capital car leurs revenus lointains sont effacés par l'actualisation face à un coût actuel qui reste entier.

Avec un taux d'actualisation de 8 %, un investissement de 1 F en l'an 2000 aura pour valeur 1/1,08 = 0,93 F en 2001 et 1/(1,08) 10 = 0,46 F en 2010.

Temps de retour

C'est le critère de choix des investissements, sous la forme d'un rapport entre les bénéfices attendus et le coût initial d'un projet, l'un et l'autre en valeur à prix constant, généralement sans actualisation.

Plus le temps de retour est court, plus le projet est intéressant. Il correspond au temps au bout duquel l'investissement a été entièrement rentabilisé.

Intensité énergétique de l'activité économique

Elle exprime la quantité d'énergie nécessaire à la production d'un franc de bien ou de service. Elle peut être mesurée au niveau d'un processus de fabrication, d'une

branche industrielle ou d'une économie nationale (le PIB dans ce cas). Son suivi dans le temps exige bien sûr des valeurs économiques à prix constant. Les deux principaux déterminants de l'intensité énergétique sont la structure de la production économique (toutes choses égales par ailleurs, il faut plus d'énergie pour produire un euro d'acier que un euro de logiciel informatique) et l'efficacité énergétique. L'évolution de l'intensité énergétique pour plusieurs pays est indiquée sur la figure 9.

Figure 9 : Intensité énergétique, en fonction du temps, d'un certain nombre de pays.

Efficacité énergétique

Toute conversion d'énergie peut être caractérisée par une efficacité énergétique, exprimée par le rapport entre la quantité d'énergie utile délivrée par le système et la quantité de sources primaires qui lui a été fourni, sous des conditions de temps et de fonctionnement données. Cette efficacité varie considérablement d'un pays à l'autre en fonction des usages de l'énergie, des sources d'énergie utilisées (l'efficacité énergétique du gaz naturel est généralement supérieure à celle du charbon), des techniques employées et de leur gestion.

Coûts et prix

Le coût est le montant des charges fixes (indépendantes des quantités produites), et variables entraînées par la production d'un bien ou d'un service, et supportées par le producteur. Le prix est la quantité de monnaie que l'on doit donner en échange d'un bien ou d'un service. Le prix dépend de la valeur (par le biais de l'offre et de la demande) et de la fiscalité.

Coût externe et coût interne

On appelle externalité toute situation où les activités d'un agent économique modifient le bien-être d'un autre agent sans qu'il y ait échange ou transaction entre eux, donc hors marché. Elles peuvent être soit positives, dans le cas d'une rénovation urbaine par exemple ou négatives, dans le cas de pollutions. Les externalités sont sources d'inefficiences économiques car :

- soit l'absence de gains récompensant les premières ne les favorise pas ;
- soit l'absence de coûts sanctionnant les secondes ne les empêche pas.

Deux solutions sont possibles selon la théorie économique :

- marchandisation des externalités sous forme d'achat-vente de droits à polluer à partir d'une attribution de droits à chaque entreprise.
- internalisation des externalités par intégration obligatoire (normes ou règlements) de leur coût dans les prix des biens ou services, le supplément de coût servant à supprimer la pollution ou à dédommager le pollué.

Crédits publics pour les études de R & D dans le domaine de l'énergie
(d'après B. Dessus)

Millions de F (1997)	1990	1992	1994	1996	1997
Énergie nucléaire	3 000	2 900	2 300	3 100	3 200
Pétrole et gaz naturel	260	220	210	200	190
Charbon	35	35	35	30	30
Énergies renouvelables	90	50	35	30	20
Maîtrise de l'énergie	350	110	60	45	30

Ces externalités sont prises en compte dans ce que l'on appelle les coûts externes. Le coût interne quant à lui inclut toutes les dépenses mises en jeu explicitement dans la réalisation du produit.

Recherche et Développement (R&D)

Les crédits publics pour les études de recherche et développement (R&D) pour les différentes filières de production d'énergie sont indiquées dans le tableau ci-dessus.

Énergie nucléaire

Structure de la matière

Dans la nature, la matière, qu'il s'agisse de matière inerte ou de matière vivante, est constituée de molécules. Ces molécules sont des combinaisons d'atomes. Les atomes comprennent un noyau autour duquel se déplacent des électrons. Chaque atome a une taille typique de 10^{-10} m soit un dix millionième de millimètre.

Le noyau de l'atome comprend des protons et des neutrons. Il y a autant de protons que d'électrons. Le noyau est environ dix mille fois plus petit que l'atome : l'atome est ainsi constitué de 99,99 % de vide ! Les protons et neutrons sont eux-mêmes composés de quarks. Ceux-ci ne se manifestent pas à l'échelle d'énergie qui nous concerne. Ces différentes échelles sont représentées sur la figure 10.

Tous les atomes dont les noyaux ont le même nombre de protons forment un élément chimique. Ayant le même nombre de protons, ils ont le même nombre d'électrons, ce qui leur donne les mêmes propriétés chimiques. Lorsqu'ils ont des nombres de neutrons différents, on appelle ces atomes des isotopes. On désigne chaque isotope par le nombre total de ses protons et neutrons. Par exemple, l'uranium 238 et l'uranium 235 ont tous deux 92 électrons. Leur noyau comporte donc aussi 92 protons. L'isotope 238 possède 146 neutrons, soit 3 neutrons de plus que l'uranium 235.

Réactions de fission et réaction en chaîne

On dit qu'un noyau lourd subit une fission lorsqu'il se fragmente, de façon spontanée ou provoquée, en deux ou plusieurs autres noyaux plus légers, tout en émettant des neutrons.

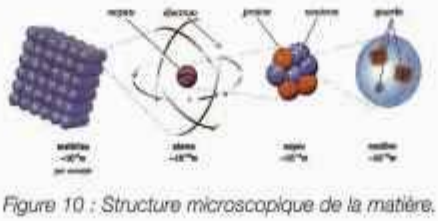


Figure 10 : Structure microscopique de la matière.

L'énergie libérée par la fission d'un noyau lourd provient de la différence d'énergie qui lie entre eux les protons et neutrons du noyau mère (en général l'uranium 235) et celle des produits de la fission. La désintégration de l'uranium produit, en plus des éléments de fission, de nouveaux neutrons qui vont pouvoir interagir avec d'autres noyaux d'uranium, et ainsi de suite : c'est une réaction en chaîne, comme indiquée sur la figure 11. On appelle facteur de multiplication le rapport k entre le nombre moyen de neutrons après la (n+1)ème génération et le nombre de neutrons de la nième génération. Suivant les valeurs de k, on distingue trois régimes :

- $k > 1$, le nombre de neutrons croît, donc le nombre de fission augmente et la réaction en chaîne s'accélère. Le système est dit surcritique, et le réacteur diverge.
- $k = 1$, le nombre de neutrons, la vitesse de la réaction ainsi que la puissance dégagée sont constants. Le système est dit en régime critique. C'est le régime de fonctionnement d'une centrale nucléaire actuelle.
- $k < 1$, le nombre de neutrons diminue, et la réaction en chaîne va s'arrêter. Le système est dit sous-critique.

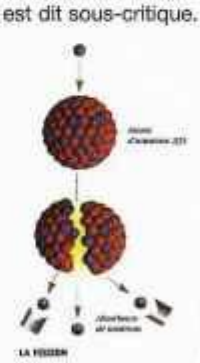


Figure 11 : Réaction de fusion d'un noyau d'uranium.

Radioactivité α, β, γ

On distingue trois types de rayonnements correspondants à trois formes de radioactivité.

- La radioactivité α (alpha) se traduit par l'émission d'un noyau d'hélium, édifice particulièrement stable constitué de deux protons et de deux neutrons, appelé particule α. Les particules α transfèrent beaucoup d'énergie à chaque choc. Elles sont donc arrêtées par une feuille de papier, par l'épiderme ou encore par quelques centimètres d'air. Cette forme de radioactivité est ainsi seulement dangereuse par ingestion.
- La radioactivité β (béta) correspond à la transformation, dans le noyau :

- soit d'un neutron en proton (radioactivité β^-), caractérisée par l'émission d'un électron.
- soit d'un proton en neutron (radioactivité β^+), caractérisée par l'émission d'un anti-électron, ou positon. Elle ne se manifeste que dans les noyaux radioactifs produits artificiellement par les réactions nucléaires. Les électrons, ou positons, transfèrent peu d'énergie à chaque choc. Il faut donc beaucoup de chocs pour les arrêter. Ils sont arrêtés par environ un centimètre d'aluminium ou encore un mètre d'air.

• La radioactivité γ (gamma), à la différence des deux précédentes, n'est pas liée à une transmutation du noyau. Elle se traduit par l'émission d'un rayonnement électromagnétique, comme la lumière visible ou les rayons X (radiographies), mais plus énergétique. La radioactivité γ peut se manifester seule ou en accompagnant la radioactivité α ou β. Elle transfère encore moins d'énergie à chaque choc. Elle est ainsi très pénétrante : il faut plusieurs centimètres de plomb ou plusieurs dizaines de centimètres de béton pour l'arrêter.

Au fur et à mesure que ses atomes instables se transforment, une substance voit sa radioactivité diminuer. On appelle période le temps nécessaire pour que cette activité diminue de moitié (voir figure 12). Cette période est caractéristique de chaque isotope radioactif. Elle peut aller de quelques fractions de secondes à plusieurs milliards d'années, selon les isotopes considérés.

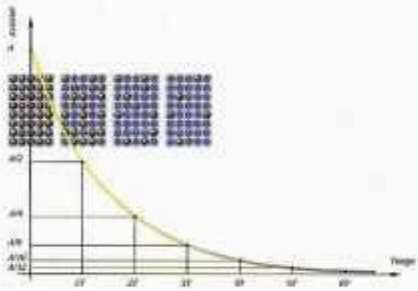


Figure 12 : Décroissance d'un noyau radioactif.

Fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisé (REP)

Dans les réacteurs à eau pressurisée (REP), actuellement les plus répandus, l'énergie provient des réactions de fission de l'uranium 235. L'eau sous pression du circuit primaire sert à la fois à ralentir les neutrons, et à évacuer la chaleur du cœur. Cette chaleur est échangée avec un circuit secondaire sans qu'aucun contact physique n'ait lieu entre les fluides des deux circuits. Un générateur récupère alors la chaleur du circuit secondaire et la transforme en vapeur. Cette vapeur d'eau actionne une turbine sous pression qui entraîne l'arbre de l'alternateur, générateur d'électricité. Le schéma d'un tel réacteur est indiqué sur la figure 13.

Dans le cœur du réacteur, la réaction en chaîne est contrôlée afin d'obtenir le dégagement de puissance désiré de façon continue. Cette puissance étant proportionnelle au flux de neutrons, il suffit, pour stabiliser la puissance, de stabiliser le flux, c'est-à-dire de réguler les fissions qui se produisent dans le cœur. Ce sont les barres de contrôle du réacteur qui assurent cette fonction. Elles contiennent une substance (appelée poison neutronique comme par exemple le bore, cadmium) qui capture les neutrons pour les

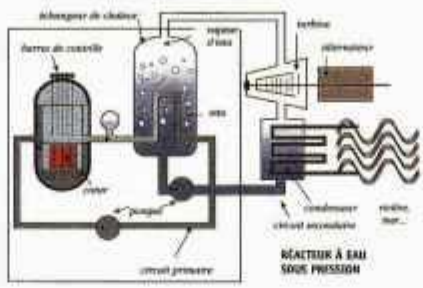


Figure 13 : Schéma de principe d'un réacteur à eau pressurisée.

empêcher de provoquer la fission d'un noyau et qui sont plus ou moins enfoncées dans le cœur en fonction du degré d'empoisonnement souhaité.

Filière de l'uranium et du thorium

Le combustible d'un REP contient de l'uranium 238 (97 %) et de l'uranium 235 (3 %). L'uranium 238 n'est pas un élément fissile, mais il produit, par capture de neutrons, du plutonium 239, élément fissile. Ainsi l'énergie produite dans un réacteur REP provient à la fois des fissions de l'uranium 235 présent au départ, et des fissions du plutonium obtenu en fonctionnement par transformation de l'uranium 238. Tout se passe donc comme si, dans une voiture, chaque fois que l'on consommait 10 litres d'essence, on en refabriquait simultanément 5 litres ! Le combustible reste trois ans dans le réacteur, et est déchargé par tiers tous les ans. Le plutonium peut aussi être utilisé directement dans la confection du combustible, mélangé à de l'uranium. C'est le combustible dit MOX.

Dans la filière du thorium, le combustible est créé dans le réacteur à partir de la transmutation du thorium qui, par capture de neutrons, produit un isotope artificiel de l'uranium, l'uranium 233, élément fissile. Aussi, contrairement au cas de l'uranium qui possède un isotope naturel fissile, l'uranium 235, le démarrage d'un réacteur chargé avec du thorium nécessite que l'on y ajoute des matières fissiles provenant du cycle uranium, comme par exemple de l'uranium enrichi en uranium 235 à 20 %. C'est le cycle thorium-uranium. Les avantages de cette filière sont doubles. Le thorium est particulièrement abondant dans la nature, trois fois plus que l'uranium. Mais surtout il conduit à une réduction importante des impacts radiologiques à long terme par rapport à ceux que présentent les diverses filières fondées sur l'uranium. La radiotoxicité est en effet réduite d'un facteur 1 000 par rapport au combustible d'uranium.

Déchets nucléaires

L'exploitation des centrales nucléaires, ou de toute autre installation utilisant des produits radioactifs (laboratoires, médecine nucléaire, industrie) produit des éléments radioactifs qui peuvent être nocifs pour l'homme. Ceux-ci sont classés, en France, en trois catégories :

• Les déchets de type A, de période courte (moins de 30 ans) de faible et de moyenne activité. Dans les centrales nucléaires, ces déchets correspondent à tous les objets contaminés : gants, filtres, résines... Chaque réacteur nucléaire produit chaque année environ 100 m^3 de ces déchets, ce qui représente un volume correspondant à une surface occupée de 6 m par 6 m sur 3 m de hauteur. Ils sont mis, une fois compactés, dans des fûts métalliques avec des surconteneurs en bétons, et sont stockés en surface. Au bout de 300 ans, la radioactivité résiduelle est comparable à la radioactivité naturelle.

• Les déchets de type B sont surtout constitués d'éléments métalliques provenant des gaines du combustible usagé ou des éléments de structure provenant du démantèlement (tout ce qui est en contact avec des produits radioactifs mais hors du combustible). Chaque réacteur nucléaire produit chaque année environ 20 m^3 de ces déchets, ce qui représente un volume correspondant à une surface occupée de 3 m par 3 m sur 2 m de hauteur environ.

• Les déchets de type C sont essentiellement les déchets du cœur de la centrale nucléaire, une fois séparé, par retraitement, l'uranium (20 tonnes par réacteur et par an) et le plutonium (200 kg par réacteur et par an). Ce sont des éléments de haute activité, dégageant de la chaleur, pendant plusieurs centaines d'années. Chaque réacteur nucléaire produit chaque année environ 3 m^3 de ces déchets, ce qui représente un volume correspondant à un cube de 1,5 m de coté environ.

La solution du stockage est essentielle pour les déchets de type C pour éviter la dissémination par les agents atmosphériques. Pour cela l'enfouissement est le moyen le plus facile. De plus cela permet d'éviter les visites « intempestives », ce qui est important si l'on souhaite conserver des déchets 100 ans ou plus, période au bout de laquelle la mémoire disparaît vite... Toutefois le stockage profond requiert une grande stabilité géologique et hydrologique et de plus les déchets conditionnés de cette manière ne sont plus facilement récupérables. On peut aussi imaginer les stocker en eau profonde, dans les grandes fosses océaniques, l'océan réalisant un tampon chimique particulièrement efficace. Toutefois les traités internationaux et l'émotion du public ne facilitent certainement pas une telle décision ! Les déchets de type B sont moins radioactifs mais représentent un volume bien plus grand. Le stockage en profondeur est sans doute aussi une solution.

Le retraitement des déchets

Au moment de leur déchargement, les combustibles usés dégagent une importante quantité de chaleur et émettent d'intenses rayonnements β et γ. Aussi doit-on d'abord les laisser refroidir en piscine, pendant une période pouvant s'étendre sur plusieurs années (3 à 5 ans dans la pratique). Après une telle période de refroidissement, deux modes de gestion des combustibles irradiés sont actuellement envisagés au plan mondial :

• La première consiste à retraiter ces combustibles de manière à récupérer l'uranium et le plutonium qui représentent respectivement 96 % et 1 % de la masse du combustible usé, les 3 % restant étant conditionnés sous forme de colis de déchets destinés, pour la plupart, au stockage en profondeur. La voie du retraitement, mise en œuvre actuellement en France à l'usine de la Hague, vise à recycler l'uranium et le pluto-

nium. Le plutonium est ensuite utilisé comme combustible Mox (mélange uranium et plutonium) dans les centrales nucléaires. Cette filière est schématisée sur la figure 14.

• Le deuxième mode de gestion, au contraire, consiste à ne pas retraiter les combustibles usés et à les stocker définitivement en couches géologiques profondes, après une période prolongée (une cinquantaine d'années environ) d'entreposage sous eau, voire ensuite à sec. Cette voie correspond soit à une politique d'attente, soit à un recours limité au nucléaire. Dans ce cas, l'uranium et le plutonium sont considérés comme des déchets et demeurent avec l'ensemble des déchets du cœur de la centrale nucléaire. Du point de vue du risque potentiel, le plutonium domine à long terme la radiotoxicité des combustibles usés.

Réacteurs hybrides

En ce qui concerne la sûreté, des perspectives attrayantes sont offertes par les réacteurs hybrides associant un accélérateur de protons à un réacteur fonctionnant dans un régime sous-critique. Un assemblage sous critique avec un coefficient de multiplication k inférieur à 1 (0,98 par exemple) peut en effet fournir de grandes quantités d'énergie à condition de disposer d'une source de neutrons adaptée pour maintenir un régime permanent.

Une telle source est envisageable à partir de réactions nucléaires particulières : lorsque l'on bombarde du plomb, par exemple, avec des protons d'une énergie adaptée, issus d'un accélérateur de particules, les noyaux de la cible éclatent en une série de noyaux plus légers, accompagnés de protons et neutrons qui, à leur tour, provoquent des réactions nucléaires dans le plomb. Pour chaque proton incident, on récupère ainsi environ 30 neutrons. Ceux-ci pénètrent alors dans un assemblage de matériaux fissiles, cœur d'un réacteur sous-critique, chaque neutron conduisant à un nombre grand mais fini de réactions de fission productrices d'énergie. Les rendements des accélérateurs modernes permettent de n'utiliser pour l'accélération des protons qu'une faible partie de l'énergie produite par le réacteur.

Le principal avantage des réacteurs hybrides, en ce qui concerne la sûreté, est que l'arrêt de l'accélérateur entraîne, ipso facto, l'arrêt de la réaction en chaîne (fonctionnement sous-critique). Il devrait être facile de réaliser des dispositifs d'arrêt automatique du faisceau au cas où le système se comporterait de façon pathologique (par exemple augmentation anormale de la température due à une panne du circuit de refroidissement). De plus, la puissance maximum du réacteur est limitée par la puissance maximum du faisceau de protons. Il s'ensuit que la seule exigence de sûreté pour éviter toute fusion de cœur d'un réacteur hybride est d'assurer, en toutes circonstances, l'évacuation de la chaleur résiduelle due à la radioactivité du combustible irradié. Cette chaleur ne représente que le dixième, environ, de la puissance thermique nominale du réacteur. La taille des réacteurs hybrides étant limitée, l'extraction de la chaleur résiduelle par convection naturelle, où, dans le cas d'éventuels réacteurs à gaz, par radiation, ne devrait pas poser de problèmes insurmontables. Les deux cycles envisageables pour la (sur)régénération du combustible sont les cycles thorium-uranium et uranium-plutonium.

Ce type de réacteurs a aussi l'énorme avantage de pouvoir servir d'incinérateur pour les déchets nucléaires produits en son sein. Il est aussi en principe possible dans de tels réacteurs d'incinérer les déchets déjà produits dans les réacteurs REP classiques. C'est une des motivations supplémentaires pour l'étude de ces réacteurs hybrides.

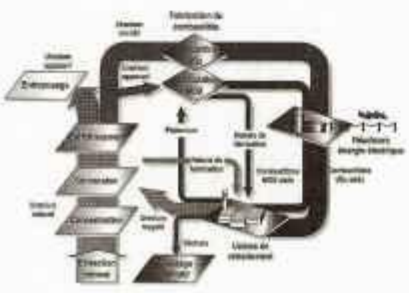


Figure 14 : Filière de retraitement des déchets radioactifs

Centrales thermiques à gaz/charbon/fuel

Centrale thermique et cycle de Carnot

Une centrale thermique classique fonctionne selon le principe du cycle de Carnot. Ce principe stipule qu'il est possible de récupérer une certaine quantité d'électricité à partir du transfert de chaleur d'une source chaude (comme par exemple de la vapeur d'eau très chaude obtenue par la combustion de gaz, charbon, pétrole ou même à partir de la désintégration d'uranium dans une centrale nucléaire) vers une source froide selon le schéma :

Chaleur de la source chaude -> électricité + chaleur à la source froide

Cette dernière est souvent aussi de l'eau (eau de rivière ou de mer) qui ainsi se réchauffe. Le principe de Carnot indique aussi que le rendement énergétique (quantité d'énergie récupérée sous forme électrique par rapport à la quantité d'énergie perdue sous forme de chaleur par la source chaude) ne dépend que de la différence de température des sources chaude et froide. Plus cette température est grande, plus le rendement est grand. Dans toutes les applications actuelles, ce rendement est alors de l'ordre de 35 %.

Cogénération

Lors du fonctionnement d'une centrale thermique selon le cycle de Carnot, une partie de la chaleur produite par la source chaude sert à réchauffer une source froide (eau de rivière par exemple). Cette chaleur peut aussi être récupérée pour être utilisée dans un réseau de chauffage urbain ou de collectivité (chauffage et eau-chaude sanitaire). On dit alors que la centrale fonctionne en cogénération (électricité ET chaleur). Cela permet de récupérer pratiquement autant d'énergie sous forme de chaleur que celle produite sous forme d'électricité.

Cycle à gaz combiné

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux utilisés par l'industrie aérospatiale ont permis de réaliser des turbines à gaz fonctionnant à haute température (environ 900°). On a donc conçu des turbines utilisant directement les gaz chauds résultant de la combustion du gaz naturel. A la sortie de la turbine, les gaz sont encore suffisamment chauds pour réchauffer de la vapeur permettant de mettre en œuvre une turbine à vapeur classique. L'association de la turbine à gaz et de la turbine à vapeur constitue le cycle combiné. L'ensemble permet d'atteindre des rendements de conversion en électricité de plus de 50 %. De plus, la vapeur obtenue à la sortie de la turbine à vapeur est encore suffisamment chaude pour être utilisée dans un réseau de chauffage urbain ou de collectivité (chauffage et eau-chaude sanitaire). Ce fonctionnement en cogénération permet alors d'atteindre un rendement énergétique total de l'ordre de 85 %.

Énergie hydraulique

Centrale STEP

Dans une centrale hydraulique de haute chute classique, l'électricité est produite dans une turbine actionnée par l'écoulement de l'eau d'une conduite forcée issue d'un lac de retenue en partie haute. Ce système peut aussi être utilisé à l'envers pour stocker l'énergie électrique : le surplus d'énergie produit par d'autres sources d'électricité est utilisé pour actionner la turbine « en sens inverse ». Elle fonctionne alors comme une pompe qui remonte l'eau d'un lac de retenue en partie basse vers le lac de retenue en partie haute, au travers de la conduite forcée. Ce système permet par exemple de stocker l'énergie produite en surplus en période de basse consommation (heures creuses) pour la restituer en période de pleine consommation (heures pleines). Le prix à payer pour ce stockage est bien sûr un rendement global de 80 %.

Géothermie

Pompe à chaleur

Le cycle de Carnot peut en fait fonctionner à l'envers :

Chaleur de la source froide + électricité -> chaleur à la source chaude

C'est le principe de fonctionnement du réfrigérateur : la source froide est constituée par le contenu du réfrigérateur en lui-même, et la source chaude est constituée par la pièce de l'habitation dans laquelle se trouve le frigidaire.

Ce principe peut alors être utilisé pour le chauffage d'habitation : c'est ainsi que fonctionne une pompe à chaleur. Au lieu d'utiliser l'électricité directement pour produire de la chaleur dans un radiateur électrique, elle est utilisée pour faire fonctionner une pompe à chaleur dont la source froide est la terre (canalisations enfouies dans le sol) et la source chaude est l'habitation ou le ballon d'eau chaude. La source froide peut aussi être l'eau de la nappe phréatique, ou l'air ambiant dans le cas d'une pompe à chaleur air/eau ou air/air.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est d'autant plus grande que la différence de température entre source froide et source chaude est petite. C'est ce qui en fait son intérêt : l'efficacité énergétique (rapport entre la quantité d'énergie récupérée de la source froide et la quantité d'électricité utilisée par la pompe à chaleur) peut être de l'ordre de 3 à 5 !

Composition des panels

Panel des citoyens

Andrée Bargettas
Enseignante en lettre

Brigitte Bessot
Bibliothécaire

Myriam Chanet
Chercheur

Bernard Dantal
Conseiller municipal délégué

Hervé Denonain
Technicien

Monique Dos Santos
Assistante sociale

Jean-Sébastien Gascuel
Agriculteur

Fabrice Ginalhac
Animateur culture scientifique

Fabien Tournut
Chef d'entreprise

Jean-Michel Vacherand
Ingénieur

Panel des experts

Jean-Louis Bobin
Université Paris VI
« Fusion »

Guy Cautenet
Université Blaise-Pascal
« Énergie éolienne »

Fernand Berthier, Alain Desplan
BRGM
« Géothermie »

Serge Lepeltier
Sénateur-Maire de Bourges
« Gaz à effet de serre et considérations géo-politiques »

Loïc Le Quilleuc
ADEME Auvergne
« Économies d'énergie »

Jean-Marie Martin
CNRS
« Macroéconomie de l'énergie »

Hervé Nifenecker, Claude Stephan
CNRS
« Énergie nucléaire »

Etienne Gehain
Gaz de France
« Piles à combustibles »

Ionel Solomon
Ecole polytechnique
« Énergie solaire »

Jacques Passavy
ADEME Auvergne
« Filière bois-énergie »

René Roy
Association Micro-centrales
« Petite hydraulique »

Une forme de débat extraordinairement riche

Une conférence citoyenne, c'est d'abord ce que chacun y apporte. L'engagement personnel des participants, qu'ils soient intervenants spécialisés, simples citoyens ou organisateurs, est essentiel. C'est bien sûr vrai de l'effort que chacun fait pour prendre sur son temps libre, mais c'est aussi un état d'esprit : venir sans parti pris mais prêt à défendre son opinion. Chacun croit à tort qu'il est spécialiste de ce qu'il sait ou, à défaut, qu'il ne sait rien.

Pour nous, cet exercice s'est révélé, en même temps qu'une formation captivante, l'occasion de partager ses convictions ou ses doutes avec d'autres. On en ressort plus riche : de connaissances, d'échanges et d'ouverture. C'est l'un des bonheurs de cette entreprise : la formation des participants permet d'enrichir constamment le débat au fil des séances.

Tous les sujets ne se prêtent pas à une conférence citoyenne. Il faut que le sujet choisi ait une « résonance » dans le groupe social : un sujet trop limité, qui intéresse quelques spécialistes et pas du tout le citoyen, n'apporte rien. De même, un sujet important socialement mais qui ne serait pas encore sorti des sphères de la recherche sera difficile à traiter car la formation initiale trop lourde à suivre.

Nous avons choisi le thème de l'énergie pour sa transversalité et parce qu'il se trouve déjà au cœur des débats de société. Il est suffisamment intégré et abordé par les citoyens : chacun d'entre nous sait ou croit savoir de quoi on parle quand on évoque le charbon, le nucléaire, les éoliennes ou l'effet de serre. La formation continue comporte donc une série d'éclairages et de mises au point pour réfléchir avec quelques spécialistes, mais il ne s'agit pas d'une formation ab initio.

Le thème sélectionné doit susciter le débat, et ne pas être trop étroit. Ainsi un sujet dont les tenants et les aboutissants seraient parfaitement connus, ne laisserait pas d'alternative et offrirait un large consensus, n'aurait guère besoin d'être discuté. Les thèmes pour lesquels les données factuelles ouvrent un éventail de choix sont donc particulièrement intéressants.

Il faut aussi savoir restreindre, si besoin est, le domaine abordé. Les premières séances de formation ont souvent pour but de mieux en cerner l'un des aspects. Par exemple, le thème de l'énergie dans son ensemble est immense, et il est vite apparu qu'il fallait le circonscrire : le choix a été fait de l'orienter vers la production d'électricité plutôt que vers le problème des transports par exemple.

Cette maturation du sujet au cours des débats est un point essentiel de la conférence citoyenne : on y trouve ce qu'on y apporte mais aussi ce que les autres y adjoignent et enfin ce que le groupe dans son ensemble élabore progressivement.

J'espère de tout cœur que cette expérience pourra s'étendre largement au delà des frontières de l'Auvergne. Un « petit guide pratique d'une conférence citoyenne » a été édité pour démystifier un peu ce type de débat. Il est disponible sur simple demande auprès du comité d'organisation.

Jean-François Mathiot

Président de la section locale Auvergne