

FRANCE : Perspectives énergétiques pour 2050

Claude Acket Pierre Bacher (SFEN GR 21)

1) Introduction.

Aujourd'hui plusieurs questions se posent avec gravité, suites à des craintes fondées:

- Quand souffrira-t-on de pénuries de pétrole puis de gaz? Va t-on dépendre du charbon comme principale source d'énergie?
- A quelles catastrophes climatiques, conséquences de l'accroissement de l'effet de serre du aux rejets de gaz carbonique, peut-on s'attendre?
- Ces menaces à venir doivent-elles modifier dès à présent nos modes de vie et nos comportements?
- Doit-on laisser faire et attendre que cela se précise ou, dès à présent par des décisions législatives, des incitations financières et donc politiques, orienter notre économie vers une réduction forte de l'utilisation des combustibles fossiles?

Du Débat National sur les Énergies sont sorties des idées directrices claires:

1. Économiser. Tout le monde est d'accord sur le principe, mais par qui et de combien? Comment y parvenir?
2. Dé-carboner. Le gouvernement a posé comme objectif de diviser par quatre les rejets de gaz à effet de serre d'ici 2050. Il faut donc s'affranchir des fossiles à moins de mettre en œuvre des procédés de séquestration du gaz carbonique.
3. Développer les renouvelables. Là-dessus aussi tout le monde est d'accord, mais dans quelle proportion et à quel coût? Peut-on remplacer les combustibles fossiles par le solaire et l'éolien? Mais comment répondre au caractère intermittent ainsi qu'aléatoire et partiellement imprévisible de ces sources d'énergie?
4. Ne pas écarter le nucléaire. Peut-on s'en passer ou ne doit-on pas au contraire fortement le développer au même titre que les renouvelables pour s'affranchir des fossiles. Le débat a avancé, le sujet est abordé avec moins de passion et d'idéologie, mais les oppositions au nucléaire sont toujours aussi marquées.

Donc beaucoup de voies sont ouvertes et les pistes ne manquent pas. Mais où est la part du réalisable dans toutes les propositions ? Si a priori aucune voie ne doit être négligée, encore faut-il proportionner les efforts (en particulier les efforts financiers) aux attentes, aux espoirs sans tomber dans l'utopie. L'horizon 2050 est lointain et les incertitudes sont multiples. Si des politiques énergétiques volontaristes peuvent se révéler efficaces d'ici là, comment évolueront

les facteurs externes, quelle sera la demande mondiale d'énergie, quel sera le prix du pétrole et du gaz ? Y aura-t-il d'éventuelles percées technologiques?

Il est bon néanmoins d'essayer de se projeter, d'avoir une vue d'ensemble mais celle-ci ne peut être unique compte tenu de ces incertitudes. Pour cerner le sujet nous nous proposons d'examiner quatre scénarios simples qui se veulent

enveloppes. Nous partirons du scénario haut, dit tendanciel, qui se place dans la continuité avec les taux actuels d'accroissement de consommation et suppose donc que les pénuries potentielles de pétrole et de gaz ne se feront pas ou peu sentir et aussi qu'aucune pression ne poussera à réduire significativement les rejets de CO². Nous regarderons à l'opposé deux scénarios bas où le maximum est fait pour s'affranchir des combustibles fossiles avec ou sans le nucléaire. Pourra-t-on en déduire une voie qui répond à la division par 4 des émissions de CO²?

2) Préliminaires: situation mondiale, notre environnement international.

Au niveau mondial, de nombreux scénarios existent en perspective des besoins énergétiques 2050. En nous plaçant du côté de la production, les estimations globales varient fortement.

- Selon les "pétroliers" ex : Shell, Total, la production atteindra 18 Gtep ⁽¹⁾ (même au-delà: 21 Gtep pour certains) pour 10 Gtep à ce jour. La part des combustibles fossiles qui actuellement représente 80 % à 8 Gtep, monte dans ce scénario à 12.6 Gtep (70 % du total et +57% en 50 ans) avec quasi doublement pour le gaz et le charbon.
- A ce type de scénario considéré comme "invivable" sous le double aspect pénurie: rareté prévisible de certains fossiles et surtout conséquences sur l'effet de serre, le Conseil Mondial de l'Énergie (WEC) préconise de viser une production globale de 14 Gtep avec une part de fossiles de 7.4 Gtep, voisine de 50 %. Ceci suppose un double effort: des économies d'énergies et un fort accroissement de l'utilisation de sources non émettrices de gaz à effet de serre.

Les économies ne peuvent être faites que là où l'on consomme beaucoup actuellement, c'est à dire dans nos pays développés. Il faudra bien prévoir de l'énergie pour les 2 à 4 Milliards d'hommes supplémentaires à venir, essentiellement en dehors de nos pays (passage de 6 Md d'habitants ce jour et entre 8 et 10 Md en 2050). Il faut également prévoir que dans les pays en développement ⁽²⁾ la consommation moyenne par habitant ne peut qu'augmenter et que tous devraient avoir accès à l'électricité (ce qui n'est pas le cas à ce jour pour 2 Md d'hommes)

Pour nous, pays développés, il en résulte deux objectifs majeurs:

- faire des efforts d'économies d'énergie importants.
- réduire au maximum la part des combustibles fossiles pour d'une part réduire les émissions de CO² et d'autre part laisser le maximum de ces combustibles fossiles à la disposition des pays en développement.

Ces mêmes pays en développement vont se tourner au départ vers les sources d'énergie rodées, bien connues et qui ne demandent pas des structures scientifiques et technologiques poussées, essentiellement les combustibles fossiles. Nous pouvons les aider à utiliser au mieux ces combustibles et aussi à s'en affranchir en passant directement à d'autres sources nouvelles, mais ceci ne peut rester que marginal.

3) Perspectives pour la France

3.1) Indications générales les 4 scénarios

Pour imaginer l'avenir, il faut déjà rappeler le passé récent, le présent et les tendances actuelles. Parmi les pays développés, la France avec une production pour consommation interne proche de 4 tep / hab. se place dans la moyenne pour la consommation énergétique (8.1 tep aux USA, 3.94 pour l'UE des 15) La France se place en dessous de la moyenne pour les rejets de CO² du fait de l'importance du parc nucléaire dans la production d'électricité (environ 2 t C/ hab /an alors que la moyenne est de 2.4 pour l'UE des 15). Si la France est, avec la Suède, parmi les premières pour l'utilisation des énergies renouvelables, grâce à l'hydraulique dans la production d'électricité, elle a moins développé les autres renouvelables, notamment l'éolien et le solaire.

De 1997 à 2002 la consommation totale d'énergie primaire a augmenté de 9.5 %, soit un peu moins de 2%/an La DGEMP a présenté, lors du Débat National sur les Énergies, le scénario tendanciel jusqu'en 2020. Dans la continuité pour répondre aux besoins la production augmenterait de 25 % en 20 ans. En poursuivant ce scénario il faudrait augmenter la production de plus de 60 %. Dans ce scénario tendanciel, l'essentiel de l'augmentation de consommation est assuré par le gaz qui fait plus que doubler (x 2.2) d'ici 2020. Cet accroissement de la consommation de gaz se retrouve en tendance générale européenne et mondiale et devrait se traduire par un fort accroissement des coûts dû à la raréfaction progressive (avec les réserves actuelles les estimations donnent 60 ans de réserve sur la base de la consommation 2000, mais cette évaluation tomberait à 30 ans si on doublait la consommation)⁽³⁾. Il se traduirait surtout par une dépendance énergétique très forte de l'Europe et de la France vis-à-vis de la Russie et de l'Asie Centrale qui détienne plus de 70 % des réserves mondiales.

Une vision différente peut être déduite de la déclaration faite par le Premier ministre à l'occasion du Débat National sur les Énergies, reprise de nombreuses fois par des hommes politiques et les médias et qui se retrouvera dans la loi: "Contribuer à la préservation de l'environnement et notamment à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La loi indiquera clairement: diviser par 4 les émissions en 2050" Les combustibles fossiles représentent à ce jour en France 132 Mtep soit plus de 50 % de l'énergie primaire. Ceci donne un rejet annuel d'environ 115 Millions de tonnes de carbone contenu dans le CO² (le CO² n'est pas le seul gaz à effet de serre, mais le plus important) Si l'on veut tenir l'objectif du gouvernement de diviser par 4 nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, il faut descendre à 30 MtC, ce qui implique une très forte diminution des combustibles fossiles. Le Livre Blanc qui a fait suite au Débat National sur les Énergies, donne des indications d'objectif d'inversion de l'évolution tendancielle: "à ce jour avec une croissance de 2% notre consommation énergétique augmente de 1.2%. L'objectif est d'atteindre en 2015 la stabilisation". Au-delà de 2015, nous n'avons pas dans le cadre du Livre Blanc de remontage 2050, hormis l'objectif de réduction d' environ 100 Mtep d'utilisation des combustibles fossiles.

Pour éclaircir l'horizon 2050 et avoir des perspectives d'actions, nous allons déjà examiner en parallèle 4 scénarios et ensuite sur ces bases faire une approche "réduction d'un facteur 4". Ces quatre scénarios se caractérisent par le taux de croissance moyen d'ici 2050 (taux ramené à 2002)

Scénario	A Haut	B Moyen	C n Bas avec nucléaire	C s Bas sans nucléaire
Électricité ⁽⁴⁾	+100% (+ 2 % / an) 900 TWh	+50 % (+ 1 % / an) 675 TWh	= 450 TWh	
Chaleur	+50% (+ 1 % / an)	=	X 2/3	- 33% (- 0.66 % / an)

(hors électricité)	110 Mtep	73 Mtep	49 Mtep
Mobilité (hors électricité)	+50% (+ 1% / an) 75 Mtep	= 50 Mtep	X 2/3 33 Mtep

De façon générale, nous supposons que le vecteur électricité évoluera différemment, car il répond le mieux à la baisse voulue de l'utilisation des combustibles fossiles, lorsqu'il a comme source le nucléaire et les renouvelables.

3.2) Économies d'énergie

Approche globale

La Commission Générale au plan a établi une base des économies possibles extrêmes. Dans certains domaines elles sont estimées à 30% à service identique, mais il est signalé que ceci demandera du temps et de l'argent et que les demandes de services peuvent croître. Les gains les plus importants doivent être attendus dans les secteurs du logement (habitations individuelles et locaux du tertiaire) et des transports.

Logements: Résidentiel et Tertiaire

1. chauffage: le chauffage représente à ce jour 62 Mtep (38 habitat et 24 tertiaire), l'eau chaude sanitaire 9 Mtep. Pour les logements anciens sans isolation la consommation peut atteindre 500 kWh/m² par an. Pour les logements neufs conformes aux dernières normes cette consommation est ramenée à 125. Certains locaux pourraient descendre à 50 kWh/m²/an (nouvelles normes, pompes à chaleur). Il faut toutefois être prudent sur ces chiffres, ils sont théoriques: logements neufs à la réception et non à l'usage (accroissement des pertes...). Au sujet de l'efficacité énergétique des bâtiments, on constate l'existence d'un parc de logements anciens mal isolés encore prédominant. On peut donc penser qu'au fur et à mesure du remplacement et des rénovations lourdes les gains apparaîtront (taux de remplacement 2%/an). Mais on constate que la consommation globale a continué d'augmenter, en dépit des progrès en isolation de ces dernières années (- 40% en 25 ans pour chauffer la même surface). Cette augmentation globale est due à l'accroissement de la taille des logements et des m² par habitant (+ 50% d'ici 2050 sur le rythme actuel?). On notera aussi un accroissement des températures moyennes des locaux: par exemple les règles des 19°C ne sont guère appliquées et l'on constate plutôt des moyennes au-dessus de 21°C (or, 1°C peut représenter 8% de plus de consommation). Le vieillissement de la population contribue à faire relever les températures moyennes de confort. En outre, la multiplication des cellules monoparentales ou des personnes seules multiplie la demande de logements, et donc les surfaces nécessaires par habitant. Enfin, la population française continue d'augmenter (environ 40% depuis 1950, moins à l'avenir : prévision + 8% d'ici 2050).
2. électricité hors chauffage: éclairage, électroménager, télévisions, ordinateurs...
Le tout représente à ce jour 167 TWh. Les progrès technologiques peuvent apporter des gains considérables (ex: les lampes basse consommation, nouveaux réfrigérateurs, puissance des veilles ...)⁽⁵⁾
Il est clair que des gains considérables en et hors chauffage (30% ponctuellement) peuvent être réalisés sur la base des techniques existantes,

en développement et avec une discipline de vie stricte. Mais ces gains, risquent d'être en grande partie absorbés par la recherche de plus de confort, surtout par ceux actuellement mal et petitement logés (cas des locaux anciens, pour lesquels on note aussi un sous équipement), par l'augmentation du nombre de foyers et par la multiplication des résidences secondaires.

Mobilité, transports

Les transports routiers occupent une place essentielle dans nos sociétés: à mobilité sont associées liberté et qualité de la vie. Par ailleurs le développement industriel a toujours été très lié aux transports, ce qu'accentue l'ouverture des marchés. La mesure de l'énergie consommée est un élément significatif de cette importance: les transports représentent près du quart de l'énergie totale consommée: au total environ 52 Mtep dont 50 Mtep de produits pétroliers. Cette dernière consommation se répartit en 25 Mtep pour les voitures individuelles, 19 pour les marchandises et 6 pour l'aérien.

La mobilité est le poste en plus forte expansion depuis de nombreuses années (+2.4 %/an). Les transports collectifs ne représentent que moins de 10% des transports passagers et 25% des marchandises. La première question qui devrait se poser dans l'avenir est l'impact de la baisse quasi certaine des ressources pétrolières et bien avant la véritable pénurie (40 ans?) avec un fort accroissement des coûts.

Des changements importants dans les motorisations et sources d'énergie sont à prévoir. On peut noter des améliorations des techniques existantes permettant de réduire la consommation (passage de 7 l/100 à 5 l/100 pour la voiture moyenne, accroissement de la diésélisation...). On aura certainement un basculement vers d'autres motorisations: voiture hybride, voiture électrique, pile à combustible... ce qui ne signifie pas nécessairement des économies si on compte la totalité du cycle. On peut penser aussi à l'utilisation de nouveaux carburants (biocarburants, carburants de synthèse).

Des gains de consommation sont possibles sur la base des technologies actuelles (10 à 15 %) et peut être un peu au-delà avec des nouvelles technologies (20 à 30 %). Sans autres mesures, ces gains risquent d'être absorbés par l'accroissement des besoins: voiture plus lourde pour notamment la sécurité, pour la réduction des bruits, mais aussi plus lourde pour l'économie d'énergie (cas de l'hybride), consommation pour le confort ex: climatisation. Seules des actions à la source par la modification de l'usage (besoins), peuvent réduire significativement cette consommation. Cela doit viser essentiellement l'accroissement des déplacements collectifs. Ces actions devront combiner des mesures coercitives (interdictions) financières (TIPP, taxes spécifiques à la puissance...) et des mesures éducatives. C'est un changement important de nos modes de vie qu'il faut envisager (limitation des transports individuels), fortes restrictions en ville, sur les grands parcours (train et voiture de location à l'arrivée, la limitation des grosses cylindrées, de nouvelles limitations de vitesses et leur imposition stricte, l'interdiction des 4x4 hors zones spécifiques, fin du tourisme au bout du monde ...).

Cependant il faut constater que l'éclatement familial (enfants faisant leurs études loin des parents, mariages lointains) se répand et tend à accroître une demande légitime de transports. De même, la dispersion de l'habitat entraîne-t-elle des besoins de transports individuels accrus. C'est donc toute la politique de la ville qui est à repenser. Il faudrait aussi ajouter que le Français change difficilement de lieu de résidence, même pour s'approcher de son lieu de travail et ainsi limiter les transports associés.

Industrie, alimentaire

Une partie importante de ce poste, qui représente 41 Mtep d'énergie finale, est basée sur l'électricité. Pour le poste principal de l'industrie, les produits intermédiaires (les 2/3 Mtep à ce jour) de grands progrès d'efficacité ont déjà été faits et se poursuivent, car économies

d'énergie signifient souvent économie générale et compétitivité. Des gains importants ne sont plus à attendre au-delà de quelques %. En revanche, pour l'alimentaire (le 1/3) des progrès significatifs peuvent être réalisés (chaîne du froid, cuisson) mais ceci risque d'être effacé par l'accroissement de la consommation de produits de plus en plus élaborés.

De cette approche par poste nous retiendrons que sortir du tendanciel est possible. Atteindre les objectifs du scénario B sobre en s'appuyant sur les progrès technologiques et de légers changements de nos modes de vie est aussi tenable. En revanche les objectifs associés aux scénarios C nécessiteront des changements fondamentaux de nos modes de vie appuyés sur des actions réglementaires et de communications fortes.

3.3) Postes de consommation et sources d'énergie

Logements: Résidentiel et Tertiaire

Gaz et pétrole assurent de façon sensiblement équivalente ensemble les 2/3 de la fourniture (avec prédominance de plus en plus marquée du gaz..). Biomasse et électricité assurent le reste de façon équivalente au niveau de l'énergie finale⁽⁶⁾. Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, une partie des besoins de chauffage peut être assurée par le bois, sous réserve de foyers adaptés, aussi bien dans l'individuel que dans le collectif. L'accent devrait être mis sur des installations de cogénération électricité chaleur et réseaux de chauffage à proximité des zones forestières. On peut prendre comme limite 15 Mtep (1.5 fois l'actuel) vers 2020 et 20 Mtep en 2050 pour l'ensemble bois, déchets agricoles en chaleur directe et en électricité. Le solaire thermique doit voir son rôle croître pour l'eau chaude sanitaire et en complément au chauffage + 6 Mtep. Enfin une meilleure utilisation de l'électricité qu'elle soit d'origine nucléaire, hydraulique ou éolienne, par exemple par utilisation des pompes à chaleur, peut réduire la consommation électrique chauffage (gain d'un facteur 3 à 4). Les pompes à chaleur s'adaptent surtout hors espaces urbains avec la géothermie de surface. Les systèmes à chaleur réversibles s'adaptent aisément à la climatisation, mais un accroissement probable des climatisations ne va pas dans le sens des économies d'énergie. Après la canicule 2003 qui pousse à l'équipement faudra-t-il réglementer, limiter la climatisation? A ce jour la climatisation fait appel à 12 TWh (dont 84% dans le tertiaire). Il est clair qu'il faut éviter les combustibles fossiles pour le chauffage, y compris le gaz. A rendement égal chez l'utilisateur le gaz rejette 17 % de moins de CO² que le pétrole et 36% de moins que le charbon. Mais ce résultat favorable vis à vis de l'effet de serre est réduit si on prend en compte les consommations énergétiques supérieures qu'impose le transport du gaz et surtout les conséquences des fuites potentielles de méthane dans toute la chaîne de production / transport. Cette baisse volontaire des combustibles fossiles devra être compensée par un fort accroissement de la part électricité et un appel important aux pompes à chaleur. Peu après la crise de 1973, des réflexions ont été menées dans divers pays dont la France pour développer le chauffage urbain, facteur d'économies (rendement des grosses chaudières, production combinée chaleur-force). EDF, voyant ses missions se diversifier, pourrait vendre de la vapeur ou de la simple eau chaude pour diverses applications. La chaleur d'origine nucléaire peut-elle participer à la satisfaction de certains besoins? Dans une optique d'extrême pénurie, la question mérite d'être à nouveau posée.

Mobilité, Transports

La question qui se pose, indépendamment des économies, est la place que le pétrole actuellement prépondérant (plus de 95%) va occuper? Sa part va-t-elle diminuer? Cela sera certainement très significatif en 2050 (pénurie très probable avec un fort

accroissement des coûts). Faut-il réserver le pétrole en priorité aux transports aériens?

On notera que le transport aérien est le poste de consommation en plus forte croissance et donc devrait faire l'objet de plus de restrictions à l'avenir en particulier via les taxes..., en favorisant au niveau Europe les modes rail TGV. Le remplacement du pétrole pour les transports terrestres doit conduire à des solutions diverses complémentaires. La part des biocarburants actuellement très faible (0.33Mtep) peut croître mais en supposant que l'on utilise les terres en jachère ou non utilisées cela représenterait 3 Mtep donc une contribution limitée. On peut aller au-delà (8 à 10 Mtep?) en empiétant sur les terres agricoles et en améliorant les rendements. Il faudra être prudent car ceci va conduire à accroître l'utilisation des engrais, insecticides et de l'irrigation (place des OGM si ceux-ci sont acceptés?).

Pour les dernières évolutions il faut noter le rôle du vecteur électricité. L'utilisation de l'électricité seule (progrès : batteries lithium avec autonomies de 300 km?) ou en complément au thermique dans les hybrides avec batteries renforcées (couverture à minima des besoins urbains et proches, à recharger au maximum hors moteur thermique par exemple la nuit) peut prendre de l'importance. Il faut souligner que plus de 45 % de la consommation particulière concerne des parcours journaliers à faible distance (< 40 km) et donc pratiquement 10 Mtep pourraient directement passer par l'électricité. L'amélioration du rendement des moteurs thermiques lorsqu'ils sont associés à la motorisation électrique des véhicules hybrides biénergie, pourrait permettre d'augmenter encore sensiblement les économies de pétrole. On pourrait aussi passer par le vecteur hydrogène dans les piles à combustibles (PAC) sous réserve qu'il ne soit pas produit à partir d'hydrocarbures comme actuellement ou de charbon sans séquestration du CO². Nous n'en avons pas tenu compte dans le bilan global, considérant qu'il peut être inclus dans la part électricité (nous pensons que la production directe d'hydrogène par des réacteurs nucléaires très haute température ne sera pas encore industrialisée à cette époque). Le développement indispensable du rail suppose un développement correspondant de l'électricité.

Globalement, la part de l'électricité qui à ce jour ne représente que 2 Mtep pour les transports ne peut que fortement augmenter surtout pour les scénarios B et C.

Industrie, alimentation

On constate depuis de nombreuses années une utilisation croissante de la part électricité. Ceci ne peut que s'accroître avec la pénurie de pétrole et aussi l'accroissement du prix du gaz, même hors prise en compte de coûts externes ou taxe carbone. Ces derniers s'ils sont adoptés ne pourraient qu'accroître la tendance du passage à l'électricité.

3.4) Développement des Énergies Renouvelables

Première approche Le futur proche 2015

Le Livre Blanc propose pour 2015

1. Pour le thermique + 50% soit +5 Mtep (passage de 11 à 16 Mtep) : surtout solaire et bois.
2. Porter à 21 % la part du renouvelable dans la production d'électricité en 2010 (directive Européenne)⁽⁷⁾ Objectifs 2010: Eolien 15 à 20 TWh, Hydraulique + 2 à 8 TWh Biomasse + 2 à 6 TWh, Déchets + 1.5 à 5 TWh Géothermie , Solaire et autres :moins de 1 TWh.

Sur la base du respect des premiers objectifs à moyen terme, on peut donc ébaucher les premiers scénarios de développement des Énergies Renouvelables. Ces

scénarios s'écartent du tendanciel (laisser faire) en faisant appel à des mesures du type réglementaires, fiscales, subventions (exemple le rachat de l'électricité éolienne imposé à EDF)...

En supposant que globalement les objectifs d'accroissement des renouvelables du Livre Blanc soient totalement réalisés pour 2015, ils apporteraient à cette date + 13 Mtep soit moins que la part de croissance de consommation nationale probable.

Perspectives "renouvelables" pour 2050

L'hydraulique

A ce jour l'hydraulique produit 70 TWh/an (hors pompage) pour une puissance installée de 21.000 MWe. En France pratiquement tous les équipements ont été faits. Il est considéré que via la petite hydraulique une puissance équivalente supplémentaire de 1000 MWe pourrait être installée (le Livre Blanc situe entre 400 et 2.000 MWe d'équipements). Ceci est peu et va à l'encontre de nombreuses pressions de protection de la nature, de priorité à l'irrigation, conduisent à voir baisser l'énergie fournie. Nous considérons donc que l'hydraulique bougera peu en absolu. On notera aussi que la capacité de l'hydraulique comme stockage tampon pour les sources intermittentes est très limitée. Cette capacité est nulle pour le fil de l'eau qui représente un peu plus de la moitié de l'énergie produite. Le stockage sous forme de pompage permet de répondre partiellement aux besoins de pointe du réseau à ce jour et donc l'hydraulique ne peut pratiquement rien apporter pour les sources intermittentes.

Le bois et déchets de bois, déchets agricoles

Le bois, source plus que traditionnelle, constitue à ce jour l'essentiel de la production des autres renouvelables: 9.5 Mtep sous forme thermique et 1.5 TWh électrique. Une meilleure exploitation des forêts, récupération du bois et déchets agricoles pourrait voir ce chiffre monter à 15 Mtep en 2020 et 20 Mtep en 2050 répartis en 18 TWh électrique (en général avec cogénération) et 16 Mtep en chaleur. L'accent est à mettre sur les chaufferies collectives et réseaux de chaleur. Le développement devrait être essentiellement local à proximité des forêts. Ceci est possible dans la mesure où l'augmentation du prix des sources fossiles rendent ces actions rentables sans excès de subventions. Nous pouvons retenir ces valeurs maximales pour les scénarios B et C.

L'éolien

Il connaît un fort développement chez nos voisins Allemands et Espagnols, ainsi qu'au Danemark. Ce développement peut se justifier par le fait que l'éolien se substitue le plus souvent au charbon ou au gaz naturel. Mais le bilan en énergie produite est décevant: en Allemagne, l'équivalent de 1200 à 1300 heures de fonctionnement à pleine puissance (hepp) en 2001, 2002 et 2003 ⁽⁸⁾, alors que l'on table généralement sur 2200 à 2500 hepp.

La France, tenue par la directive européenne de fournir en 2010, 21 % de son électricité par des sources renouvelables, s'engage dans cette voie, bien que la production éolienne ne diminue pas ses émissions de gaz à effet de serre puisqu'elle se substitue au nucléaire. Cela conduirait à installer entre 7.000 et 10.000 MWe d'éoliennes pour 2010. En supposant un taux moyen d'utilisation optimiste de 25 % soit 2.200 heures par an, l'énergie produite serait donc comprise entre 15 et 22 TWhe. Ceci peut paraître peu. Mais avec les taux actuels de rachat de l'électricité éolienne (83 €/ MWh) et en tenant compte que le seul coût économisé (combustible et de déchets) n'est que de 10 €/ MWh, le surcoût sera de l'ordre de 1,5 Md € /an.

En dehors de l'aspect coût qui restera prédominant pour les scénarios A, B, et Cn, le point le plus important qui limitera l'éolien est associé au caractère intermittent et relativement imprévisible à moyen terme de la production. De façon simplifiée il faut considérer qu'à chaque MWe éolien installé doit être prévu 0.9 MWe d'une autre source d'appoint disponible, souple, contrôlable qui produira donc au moins 3 fois plus d'énergie (75% du temps) ; Sera-t-elle vraiment non émettrice de GES? Ce sera la limitation du scénario Cs.

Solaire.

Le solaire chaleur peut jouer un rôle important pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage. Il faut le développer et il n'est pas exclu de fournir par cette voie une partie significative des besoins en confort thermique. Si on admet que la moitié des logements et du tertiaire peuvent voir 70% de leur eau chaude sanitaire fournie par cette source, cela représente 2.5 Mtep. L'apport eau chaude chauffage ne peut concerner que moins de logements (10%?) et pour ceux-ci couvrir 60% des besoins. Ceci donne 3.5 Mtep. Au total le solaire thermique peut donc fournir 6 Mtep en 2050. En revanche, le solaire électricité (photoélectricité) ne peut connaître un développement significatif compte tenu de son coût, que dans un scénario où les autres sources sont devenues aussi très chères (Cs) ou dans des zones dépourvues de réseaux de transport et de distribution d'électricité (pays en développement ou îles).

Le développement de la photoélectricité doit être lié aux exportations d'équipements, associées à des aides vers les pays les plus pauvres dépourvus de réseaux surtout en Afrique, à condition que les pays riches assurent l'essentiel du coût de l'investissement.

Biocarburants

L'usage des biocarburants agricoles à ce jour négligeable devrait s'accroître fortement. Avec les rendements nets croissant progressivement de 1 à 2 Mtep / hectare et des surfaces cultivées pouvant atteindre 4 à 5 Mha, on peut envisager jusqu'à 8 à 10 Mtep en 2050. Ceci sera néanmoins à contrôler par les besoins en terres agricoles, les consommations d'engrais et l'irrigation. Il faut être attentif aux choix de cultures car actuellement certaines n'ont pas nécessairement des effets positifs nets vis à vis de l'effet de serre (attention engrais, irrigation). Le bois pourrait aussi entrer dans la production de biocarburants. Il faudrait alors réduire d'autant la part chauffage et électricité associée dans la mesure où pour les scénarios B et C nous supposons une utilisation maximale de la forêt. Nous n'en tenons donc pas compte dans cette approche globale.

Déchets ménagers et industriels

Indépendamment des besoins énergétiques, nous devrions voir s'étendre l'incinération des déchets avec récupération d'énergie en général en cogénération associée à un réseau de chaleur lorsqu'il existe dans le voisinage. Tous les déchets ne sont pas à ce jour récupérés et pour ceux qui sont incinérés, l'énergie pas toujours récupérée.

La valorisation thermique (réseau de chaleur) et électrique de tous les déchets pourrait fournir 5 Mtep en thermique et 5 TWh en électricité avec cogénération.

Géothermie

En France la première utilisation basse température ne représente que 0.2 Mtep à ce jour, mais une expansion relative importante est envisageable pour le chauffage de logements en quelques sites spécifiques et généralisé en association à la pompe à chaleur. Ce sera l'aspect coût des combustibles fossiles qui poussera à ce développement. (de 1 à 7 Mtep selon les scénarios).

La deuxième utilisation, haute température, ne s'applique à ce jour que dans les DOM TOM avec notamment en Guadeloupe: 4.2 MWe à ce jour (21 GWhe en 2000 soit 4600 Tep) et une extension prévue à 15 MWe. Des recherches (en Alsace) pourraient donner des apports identiques, mais ceci reste insignifiant (projet Alsace 6 MWe). Retenons 5 TWh pour la géothermie électricité scénarios B et 10 TWh scénarios C.

3.5 L'option Nucléaire

A ce jour 58 tranches d'une puissance totale de 62.000 MWe fournissent 400 TWh par an (77 % de l'électricité produite en France). La première mise en service a été effectuée en 1977. La durée de vie initialement prévue de 30 ans devrait pouvoir atteindre 40 ans ou un peu plus. La question d'une suite se pose donc à partir de 2017. Mais comme il faut au minimum 6 ans pour construire une tranche et plus en tenant compte des délais administratifs (2 à 3 ans) c'est avant 2008 que des décisions doivent être prises pour le remplacement en série sur la base de 40 ans de vie. La solution pourrait être le choix dit "évolutionnaire": modèles dits de troisième génération dans la continuité des réacteurs existants améliorés. En France, la référence serait le projet désigné EPR, dont la construction, au titre tête de série a été décidée en octobre 2004 sur le site de Flamanville. En 2050, toutes les tranches actuelles (puissances entre 900 et 1.500 MWe) auront été arrêtées.

A puissance globale installée égale, le remplacement en totalité suppose 40 tranches EPR (effet de taille: 1.600 MWe et amélioration attendue de la disponibilité). Ceci est tout à fait réalisable. Après s'être assuré du bon fonctionnement d'un démonstrateur (conforté par le suivi de la tranche EPR en Finlande) il sera facile de lancer la construction de 2 tranches par an ou 3 tranches tous les 2 ans, ce qui se fera dans des conditions industrielles et financières meilleures que lors du lancement de la génération précédente (jusqu'à 6 tranches par an) Une partie au moins des dernières tranches arrêtées pourrait être remplacée par de nouveaux modèles de réacteurs, ceux dits de quatrième génération, s'ils ont fait leurs preuves d'ici là. Ces réacteurs n'en sont pour l'instant qu'au stade d'avant projet pour des premiers modèles de puissance réduite (200 à 300 MWe). Il est peu probable que pour 2050 ceci représente un débouché industriel significatif. Seul un fort développement du nucléaire mondial avant 2050 pourrait conduire à accélérer le développement des filières surgénératrices de cette quatrième génération du fait d'un début de tension sur le marché de l'uranium naturel. On peut donc en déduire que techniquement, le nucléaire peut se maintenir sans difficulté au niveau actuel. Il est possible d'aller au-delà de ce niveau. Après un premier EPR de démonstration, en remplaçant par exemple tranche par tranche les 900 MWe puis les 1300, 1450, par des EPR de 1600 MWe, on pourrait installer 30 GWe de plus et produire 620 TWh /an. C'est la limite retenue dans le scénario tendanciel.

3.6) Les remontages des quatre scénarios Le tableau récapitulatif présente un remontage possible des quatre scénarios. Il a été complété par l'estimation des rejets en Millions de Tonnes de Carbone ⁽⁹⁾

a) Scénario A tendanciel

Les hypothèses initiales de ce scénario "laisser faire" dans la continuité des évolutions actuelles, conduisent à un accroissement global énergétique final de 62 % toutes sources confondues. La répartition par sources d'énergie est la suivante:

- Nucléaire: 620 TWhe. Ceci correspond à la mise en place de 59 tranches EPR.
- Gaz: 60 Mtep et 154 TWhe. Ce fort accroissement du gaz (x 2.8) se retrouve dans l'utilisation directe chaleur et aussi pour la production électrique. On est dans la continuité du scénario tendanciel de la DGEMP (x 2.2 en 2020)

- Pétrole: 100 Mtep . Le pétrole augmente peu et uniquement pour la mobilité (+ 24 Mtep)
- Charbon: 6 Mtep et 30 TWh (sans changement).
- Renouvelables: 19 Mtep et 96 TWh. Dans ce scénario le développement des renouvelables est réduit au strict minimum, pour respecter les engagements européens déjà pris.

Ce scénario avec dans la continuité un fort accroissement des combustibles fossiles conduit comme facilement prévisible à un accroissement des rejets de CO² de + 50 %.

Quels seront les facteurs majeurs qui viendront infléchir ce scénario?: l'accroissement des coûts du gaz et du pétrole (voir ci dessous § 3.8) ou la pression environnementale de réduction des rejets?

b) Scénario B "Sobre" , consommer avec modération

Compte tenu de l'accroissement prévisible de la population (+ 8 % d'ici 2050) la consommation énergétique par habitant reste proche de l'actuelle + 3 % seulement. Cet accroissement devrait surtout se faire sentir dans les 10 à 15 prochaines années, puis se stabiliser. Ce scénario se situe dans un contexte général d'absence de crise grave pétrolière et/ou gazière, mais une tendance à l'accroissement des coûts de ces combustibles et une sensibilisation pour limiter l'accroissement des rejets de CO². La répartition par sources d'énergie est la suivante :

- Nucléaire: 493 TWh. En supposant que les nouvelles tranches sont du type EPR, toutes les tranches actuelles ne doivent pas être remplacées compte tenu de l'accroissement de puissance unitaire.
- Gaz: 46 Mtep et 30 TWh (pointe réseau). La forte augmentation du gaz devrait être très sensible dans les 20 premières années, mais moins que dans le scénario tendanciel.
- Pétrole: 45 Mtep. Le pétrole reste uniquement affecté à la mobilité. (il ne faut pas oublier hors énergie la pétrochimie 10 MTP à ce jour, qui sera toujours demandeuse sur le marché)
- Charbon: 30 TWh pointes réseaux
- Renouvelables: 32 Mtep et 122 TWh. La place des autres renouvelables est d'autant plus significative que l'hydraulique, point fort à ce jour ne bouge pas. L'effort principal porte sur la biomasse (bois, déchets...) mais le caractère intermittent de l'éolien limite sa pénétration.

Il faut surtout noter le basculement de plus en plus important vers le vecteur électricité, y compris pour la mobilité. Il s'agit d'une hypothèse forte, qui sous-tend une modification profonde du parc automobile. Globalement les combustibles fossiles baissent, l'accroissement relatif du gaz permet d'accroître cette baisse vis à vis des rejets de CO², mais ceux ci ne baissent globalement que de 26 %. C'est beaucoup mieux que A mais on est encore très loin du facteur 4 par rapport à ce jour.

c) Scénario Cn Restrictions, Nucléaire accepté

On se place dans un contexte que l'on pourrait appeler de crises, que celles-ci soient brutales, du type des crises pétrolières de 70 fortement accentuées et durables ou alors une approche continue mais marquée vers la rareté du pétrole puis du gaz. Il s'ensuit donc une forte augmentation des prix du pétrole et du gaz. Il est considéré que le prix du charbon augmente peu car le charbon est encore très abondant. Mais ceci ne conduit pas pour autant à l'utiliser à la place du gaz compte tenu des faibles quantités en jeu et de la place du nucléaire.

Ceci se traduit par une baisse de la consommation globale de 23 % soit par habitant – 29 %. Ceci suppose des changements importants des modes de vie et des comportements qui ne peuvent se faire que sous de fortes pressions financières et réglementaires.

La répartition par sources d'énergie est la suivante:

- Nucléaire: 280 TWh. Sur la base de tranches EPR il en faut 2 fois moins qu'actuellement.
- Gaz: 15 Mtep et 40 TWh (pointe réseau)
- Pétrole: 23 Mtep . Comme dans B le pétrole reste réservé à la mobilité. Mais on notera l'importance relative des biocarburants et de l'électricité dans la mobilité.
- Renouvelables: 44 Mtep et 130 TWh. L'effort fait en B est accentué. L'éolien reste à un niveau modéré, si on ne veut pas faire jouer au nucléaire un rôle important dans la complémentarité (il faudrait installer plus de tranches avec un moins bon facteur de charge, sans aucun gain sur les rejets de CO² (un peu moins de déchets nucléaires).

Les rejets de CO² sont divisés par 3. La voie semble tracée vers le facteur 4 mais du chemin reste à faire.

d) Scénario Cs Restrictions, Nucléaire refusé, "sortir du nucléaire"

Dans le même contexte général de crise que le précédant, la source nucléaire est refusée par la population. Dans cette situation les aspects coûts et risques d'interruption de fourniture qui, dans les scénarios précédents pouvaient limiter la pénétration de certains renouvelables deviennent secondaires. Globalement, la baisse est la même que dans le scénario précédent : - 29 % par habitant.

La répartition par sources d'énergie est la suivante:

- Renouvelables: 44 Mtep et 211 TWh.
- Charbon: 199 TWh. (l'aspect coût conduit à s'appuyer sur le charbon et non sur le gaz en dépit des rejets supérieurs)
- Gaz: 15 Mtep et 40 TWh
- Pétrole: 23 Mtep

Les rejets de CO² ne baissent que de 22 % (division par 1.28) en dépit des économies d'énergies et du développement des renouvelables. L'apport des combustibles fossiles est encore important avec l'accent mis sur le charbon compte tenu du coût du gaz. Si les 199 TWh charbon, étaient produits avec du gaz les rejets globaux seraient encore de 70 MtC. La baisse passerait de 22% à 39 %, soit une division par 1.64 au lieu de 1.28.

Tableau le remontage des quatre scénarios

	2002	A	B	C n	C s
ÉLECTRICITÉ TWh					
Nucléaire	400	620	493	280	0
Hydraulique	70	70	70	70	70

Éolien		15	22	22	88
Photovoltaïque		1	2	5	20
Bois et déchets	4	10	23	23	23
Charbon	30	30	30		199
Gaz naturel	20	154	30	40	40
Divers (géothermie...)			5	10	10
Total électricité Brut dont exportation	525 - 75	900	675	450	450
Électricité TWh (inter) Évolution / 2000	450 TWh	900 TWh x2	675 TWh x1.5	450 TWh =	450 TWh =
CHALEUR Mtep					
Solaire chaleur		2	4	6	6
Géothermie		1	2	7	7
Gaz naturel	29	60	46	15	15
Pétrole	26	26			
Charbon	6	6			
Bois/ Déchets	12	15	21	21	21
Total Chaleur Mtep Évolution / 2000	73	110 x1.5	73 =	49 x 2/3	49 x 2/3
<i>Chaleur via électricité (déjà compté)</i>	<i>122 TWhe</i>	<i>337 TWhe</i>	<i>203 TWhe</i>	<i>122 TWhe</i>	<i>122 TWhe</i>
MOBILITE Mtep					
Pétrole	50	74	45	23	23
Biocarburants		1	5	10	10
Total Mob (hors élect) Évolution / 2000	50	75 x 1.5	50 =	33	33
<i>Mobilité électricité (déjà compté)</i>	<i>9 TWhe</i>	<i>18 TWhe</i>	<i>58 TWhe</i>	<i>41 TWhe</i>	<i>41 TWhe</i>
Rejets C. ⁽¹⁰⁾ MT/an Évolution / 2000	115	173 x1.5	85 / 1.35	38 / 3	90 / 1.28

3.7 Diviser par 4 les rejets? Un scénario vertueux V 1/4 ?

Sur la base des scénarios précédents qui donnent des ordres de grandeur, nous allons essayer de faire ressortir les voies qui permettraient d'aboutir à l'objectif de réduction par 4 des rejets de CO². Une constatation préliminaire s'impose: la France a déjà fait une partie du chemin, grâce au nucléaire qui lui a permis de limiter ses rejets: moins de 120 MtC (au lieu de 173 MtC si les centrales nucléaires étaient remplacées par des centrales au gaz pour la production nationale d'électricité). Réduire encore d'un facteur 4, donc viser 30 MtC, nécessite de réduire encore de 8 MtC par rapport au scénario le plus bas, ce qui peut être obtenu, par exemple, en supprimant 11 Mtep de gaz ou 9 Mt de pétrole, ou en répartissant 5 Mtep en gaz (

chaleur) et 5 Mtep en pétrole (mobilité) comme la lecture de la colonne Cn, du tableau ci dessus peut le suggérer. Si nous retenons l'objectif de 493 TWh pour le nucléaire comme dans le scénario B et les objectifs de renouvelables comme dans Cs, nous disposons de 212 TWh disponibles pour remplacer pétrole et gaz et aller au delà dans les disponibilités énergétiques.

Ceci donnerait en remontage avec comme répartition par sources d'énergie la suivante:

- Nucléaire: 493 TWh idem B
- Gaz: 10 Mtep (Cn ou Cs, réduit de – 5 Mtep) et 40 TWh (idem Cn ou Cs)
- Pétrole: 18 Mtep (Cn ou Cs, réduit de 5 Mtep).
- Renouvelables: 44 Mtep (idem Cn ou Cs) et 130 TWh (idem Cn)

Nous retrouvons le même apport des renouvelables que pour le scénario Cn avec nucléaire, par contre si les sources renouvelables chaleur sont les mêmes qu'en Cs (sans nucléaire) la part électricité renouvelable est moins développée (moins d'éolien)

Le tableau suivant permet de suivre l'évolution entre 2000 et 2050 des différents postes de consommation et sources de production associées (données toujours ramenées à la production) pour ce remontage V 1/4

	Électricité TWh		Électricité TWh		Électricité TWh		Électricité TWh		Électricité TWh		Électricité TWh	
	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050
Logements	122	190	17	0	21	6	1	0	10	28		
Chauffage et eau chaude												
Électricité spécifique	167	150										
Ind / Alim	150	237	9	0	12	4	6	0	1	6		
Transports	10	86	50	18							0	10
Total TWh	450	663										
Total Mtep			76	18	33	10	7	0	11	34	0	10

Électricité 2050 663 TWh

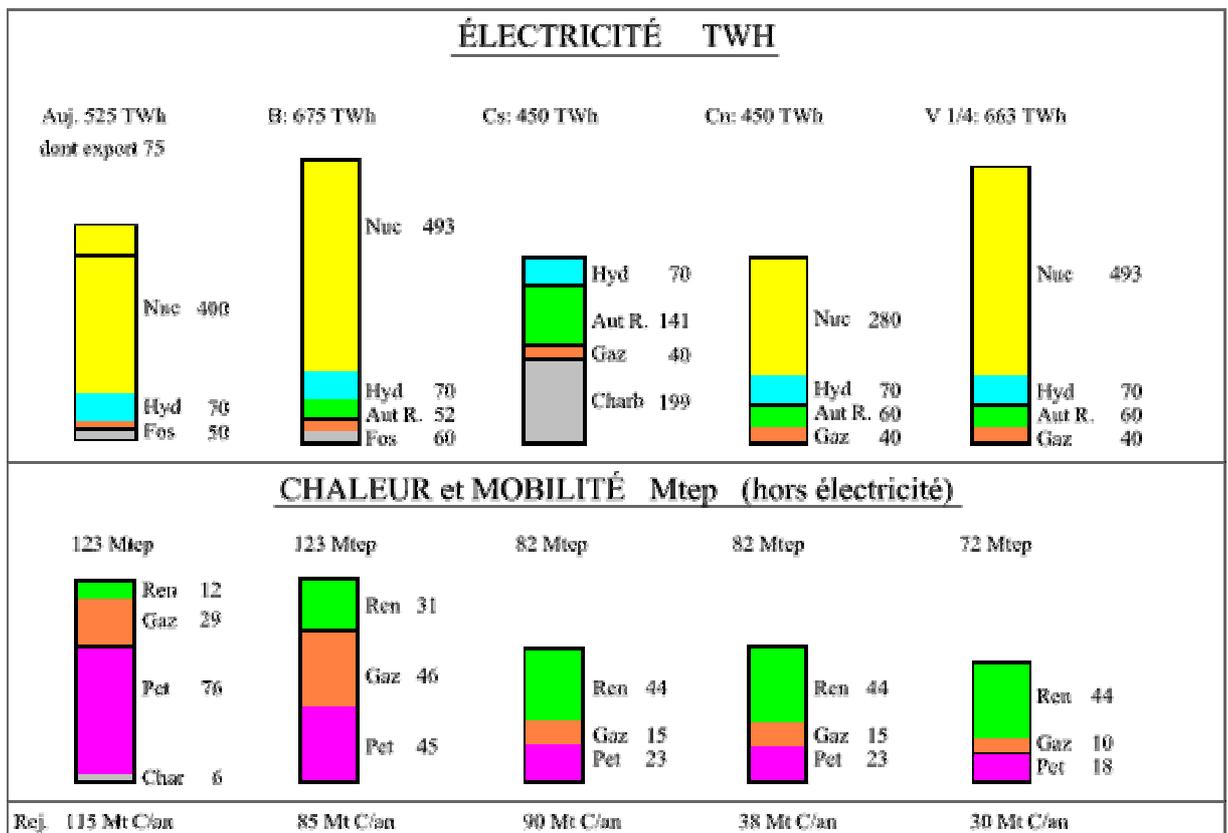
Nucléaire 493 TWh (74 %)
 Hydraulique 70 TWh (10 %)
 Gaz 40 TWh (6 %)
 Bois Déchets 23 TWh
 Éolien 22 TWh
 Divers Renouv 15 TWh

Nota: une partie des ressources bois pourrait augmenter la part des biocarburants au détriment des autres utilisations chauffage.

Récapitulatif

Le schéma ci dessous donne une vue d'ensemble des remontages les plus caractéristiques :

- Situation actuelle: 450 TWh électricité en consommation interne plus 75 TWh en exportation 123 Mtep en chaleur et mobilité.
- Le remontage B sobre ou pragmatique qui suppose l'absence de crises graves sur les marchés du pétrole et du gaz mais comporte des efforts d'économies d'énergies par rapport au tendanciel ainsi que l'apport des renouvelables.
- Le remontage Cs crises, qui exclut le nucléaire, suppose de fortes actions d'économies d'énergies et un fort développement des renouvelables. Il conduit à un fort appel au charbon compte tenu de la raréfaction du gaz.
- Le remontage Cn crises, suppose de fortes actions d'économies d'énergies , un fort développement des renouvelables et l'apport significatif du nucléaire pour limiter l'utilisation des fossiles.
- Le remontage «vertueux» V 1/4 qui arriverait à répondre à l'objectif de division par 4 des rejets de CO².



3.8 Les coûts, la facture énergétique

Nous avons indiqué ci dessus que le facteur coût allait infléchir les choix. Nous allons essayer de donner quelques ordres de grandeur pour mieux situer cette importance.

La facture énergétique s'élevait à 42 Md € en 2002, soit 2.6 % du PIB donc relativement 2 fois moins qu'en 1982. Ceci explique que l'économie de façon générale est maintenant moins sensible aux variations des coûts des matières énergétiques de base comme le pétrole que lors des premiers chocs pétroliers. Comment cette facture va t-elle évoluer selon les différents scénarios? Pour y répondre nous indiquons les hypothèses de base adoptées.

1. Le nucléaire
Il ne devrait pas voir son coût évoluer autour de la base actuelle de 30 €/MWh. Les tranches en service en 2050 devraient en majorité être du type

EPR. Le prix d'uranium actuellement très bas devrait augmenter, mais il entre pour une faible part dans le prix du kWh (5%) Son doublement ne donnerait qu'un surcoût de 1.5 €/ MWh. Les nouveaux réacteurs de la famille quatrième génération (qui devraient notamment faire face à la pénurie ultérieure d'uranium grâce à la surgénération) devraient avoir un coût du MWh plus élevé (+20 / 30%?) Ils n'auront en 2050 encore qu'une faible pénétration industrielle et nous n'en tenons pas compte.

2. Le pétrole
La base 2002 est le coût de 25 \$ le baril de pétrole avec un € =0.95 \$ soit 207 € / tep Ce prix est très fluctuant : par exemple en 2004 le baril a atteint 55 \$ mais avec un € = 1.2 \$ soit 378 € / tep et nul ne sait ce qu'il sera demain. Nous retenons 40 € le baril (275 € / tep) dans le scénario A tendanciel en 2050 (qui ne se conçoit qu'avec un coût du pétrole encore modéré). Nous doublons cette valeur dans le scénario B : 550 € / tep et le triplons dans les scénarios C associés à des crises sur ces marchés : 825 € /tep (baril à 120 €)
3. Le gaz
Nous supposons que le gaz a une évolution proche de celle du pétrole et prenons les mêmes valeurs à la tep. Pour la production d'électricité les coûts en 2000 étaient de 35 € / MWh. Nous retenons en 2050, un coût de 46 € / MWh dans le scénario tendanciel, 93 €/MWh dans le scénario vertueux et 138 € / MWh dans les scénarios C
4. Le charbon
L'importance des réserves mondiales de ce combustible conduit à ne pas considérer de pénurie pour 2050 et seulement une faible pression sur les coûts pour tous les scénarios. Hors séquestration on retiendra 225 € /tep.
5. L'éolien
Actuellement le prix de rachat imposé à EDF est de 83 € / MWh. Cette situation acceptable au lancement d'une nouvelle technologie ne peut le rester à long terme. Le surcoût pour 20 TWh serait de 1.5 Md €. Cette filière a atteint sa maturité industrielle (plus de 25.000 MWe en Europe dont 14.600 en Allemagne) au moins pour l'éolien terrestre. Les effets d'échelles sont déjà quasiment acquis et une baisse significative des coûts semble exclue. Nous retenons: 60 € / MWhe.
6. La biomasse
Il est considéré qu'actuellement la biomasse serait concurrentielle avec un pétrole à 50 €/ baril soit 393 € / tep. Nous retiendrons ce chiffre en thermique. Dans des installations actuelles bois et cogénération, un coût de 80 €/MWh est retenu. Ceci ne devrait pas varier dans le temps.
7. Solaire chaleur
Nous retenons le même chiffre que la biomasse thermique
8. Biocarburants
Nous retenons un coût de 750 €/tep

Résultats coûts directs

Scénarios	2000	A	B	Cn	Cs
Facture Énergétique	40 Md €	86 Md €	91 Md €	64 Md €	74 Md €

Pour relativiser l'importance de la facture énergétique, il faut la ramener au PIB (2.6% à ce jour). Si le PIB peut doubler dans les scénarios A et B, la valeur relative de la facture énergétique restera inférieure à 3 % Dans les scénarios associés à des crises C, le PIB devrait moins augmenter et la valeur relative de la facture devrait croître sans pour autant atteindre les 5 % connus dans les années 70.

Les coûts externes

Les coûts évoqués jusqu'ici n'intègrent pas les coûts dits externes (impact sur l'environnement: santé, forêts et sanitaires: morts évités ...). Une étude a été faite par la Commission Européenne: "Extern E", pour chiffrer le surcoût correspondant. La dernière analyse parue de l'OCDE et reprise par le ministère de l'Industrie (juin 2003) donne les coûts suivants pour des mises en service en 2015: Nucléaire, coût externe: 2.4 € /MWh ; Gaz, coût externe: 7.4 € /MWh ; Charbon, coût externe : 15.8 € / MWh . Cette approche "coûts externes" sera peut être abordée d'une autre façon, par la taxe carbone associée au CO². Le rapport Charpin l'évalue de 61 à 150 € la tonne de Carbone rejetée. En adoptant la plus basse valeur 61 € / tC nous obtenons les résultats suivants :

Scénarios	2000	A	B	Cn	Cs
Coûts externes	7 Md €	10,5 Md €	5,2 Md €	2,3 Md €	5,5 Md €
% / Facture énerg	17,5 %	12,2 %	5,7 %	3,6 %	7,4 %

On notera que cette prise en compte des coûts externes passe de 12.4 à 3.3 % selon le scénario. Si ceci est significatif et peut influencer ou faire basculer des décisions ponctuelles, les choix fondamentaux ne devraient pas y être sensibles. Il faudrait plus que doubler la taxe carbone, ce qui peut être cohérent avec les scénarios C, et adopter les valeurs hautes pour avoir un véritable effet.

Pour le scénario Cs, la séquestration du carbone pour les centrales électriques brûlant du charbon peut réduire les rejets comme indiqué § 3.6 d. Les estimations actuelles chiffrent le coût minimum de la séquestration à 50 € /tC ce qui est proche des 61€ /tC en coût externe pris et donc globalement l'aspect financier est équivalent.

Nota: Pour situer l'influence possible de la taxe carbone au niveau individuel on peut donner l'exemple de la voiture personnelle. Sur une base de 150 € / tonne de carbone rejeté la taxe serait de 0.1 € /litre d'essence à situer par rapport au prix actuel supérieur à 1€ dont environ 0.7 déjà sous forme de taxes. Ceci ne sera pas une incitation fondamentale à modifier les usages.

4) Bilan Conclusions

En remontant les quatre scénarios, nous n'avons pas voulu aboutir à un remontage théorique, idéal, modèle de référence. Nous avons cherché à donner des repères chiffrés approximatifs, des ordres de grandeur pour orienter les réflexions sur le bouquet énergétique en 2050. Il ressort que d'un côté, s'il faut (et cela est possible) s'écarter du tendanciel, à l'opposé, tout scénario qui exclut le nucléaire ne peut répondre à l'objectif de baisse substantielle de la dépendance vis à vis des combustibles fossiles (gaz et charbon) et donc des rejets de gaz à effet de serre. Entre les deux scénarios B " sobre" et Cn avec fortes économies d'énergie et nucléaire, des solutions peuvent s'imaginer pour approcher l'objectif diviser par 4 les émissions en 2050 .

Il faut retirer essentiellement la nécessité d'agir sur tous les fronts.

- les économies d'énergies restent la priorité. Pour espérer approcher les 30 % nécessaires il faudra passer par des actions lourdes financières et réglementaires, anticipant sur les lois du marché qui arriveront tardivement.

- il faut faire appel à toutes les sources renouvelables et au nucléaire, mais: le caractère intermittent et le coût de certains renouvelables limitera leur pénétration ; parmi les renouvelables les efforts maximums doivent porter sur la biomasse (dont le bois) et le solaire thermique, suivant en cela les recommandations de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) Pour le photovoltaïque, les efforts devraient en priorité porter sur la recherche et le développement pour en augmenter l'efficacité et en réduire le coût le nucléaire basé sur le modèle EPR doit se maintenir à minima au niveau actuel, voire progresser. Le vecteur électricité doit voir sa place fortement renforcée y compris dans la chaleur et la mobilité.
- la recherche doit de façon générale se poursuivre dans tous les domaines, mais il faut choisir les priorités lors du passage au développement industriel

Remarque:

Dans tout ce qui précède, nous avons admis sans discuter l'objectif gouvernemental officiel (atteindre en 2050 le quart des émissions actuelles de CO²). Or, cet objectif est d'autant plus difficile à atteindre que la France a un taux d'émissions déjà bas grâce à son programme nucléaire.

Cet objectif la pénalise donc par rapport à des pays voisins qui ont encore la possibilité physique de diminuer leurs émissions par un déblocage politique de leur programme nucléaire. D'ici 2050, il est plus que probable que les opinions publiques de certains pays évolueront, comme on le constate déjà en Suède, ce qui les incitera à reprendre la construction de nouvelles centrales nucléaires. Le renchérissement des produits carbonés (et les éventuelles taxes sur les émissions de carbone) aideront efficacement à faire évoluer l'opinion. Il paraît donc injuste d'exiger de la France une diminution d'un facteur 4 si ce facteur est celui qu'on s'impose pour la moyenne européenne.

Si la France ne produisait qu'un tiers de son électricité par le nucléaire, comme en Allemagne (qui se situe à peu près dans une situation moyenne européenne) et le complément par du charbon, ses émissions seraient accrues de 65 MtC et se situeraient au niveau global de 180 MtC. L'objectif de réduction d'un facteur 4 par rapport à ce niveau de départ conduirait à 45 MtC, objectif nettement plus raisonnable.

Dans le même ordre d'idées, la directive européenne exigeant de produire 21% d'électricité par le renouvelable est peu justifiable pour la France puisque l'énergie éolienne (la seule capable d'ici cette date d'apporter les 5 à 6% supplémentaires) se substituerait chez nous à une source d'énergie qui ne produit déjà pas de gaz à effet de serre (le nucléaire), contrairement à ce qui se passe dans les pays voisins où ce sont les énergies fossiles qui sont effectivement diminuées.

Enfin, il est permis de s'interroger sur ce que signifiera une politique "française" de l'énergie dans le contexte d'une Europe de plus en plus intégrée. Et pourquoi ne pas exporter beaucoup plus d'énergie électrique que l'on en consomme si toutes les conditions de sûreté de l'époque (y compris pour les déchets, bien sûr) sont satisfaites?

Notes

(1) Pour avoir une vue d'ensemble il est usuel de ramener toutes les énergies produites à une unité commune: - Pour les usages thermiques, l'unité habituellement utilisée est la "tonne équivalent pétrole" (tep, qui vaut 42 GJ) ce qui s'explique par la prédominance du pétrole. Les correspondances sont simples et sans ambiguïté pour les sources fossiles et la biomasse, par exemple: 1 tep -> 1,6 tonne de charbon (variable selon les qualités) ; -> 1.075 m³ de gaz ; -> 2,2 tonnes de bois ... - - Les correspondances sont moins simples lorsque le vecteur énergétique est l'électricité, car la quantité d'énergie fournie à l'utilisateur (le kWh électrique), exprimée en Joules, peut être très différente de la quantité d'énergie "primaire" qui a servi à la produire, elle aussi exprimée en Joules (le rapport est de 30 à 60 % pour les centrales thermiques, et supérieur à 90 % pour les centrales hydrauliques). Une ancienne convention qui apparaît encore dans de nombreuses publications et notamment les anciennes, donnaient une seule équivalence de

1 TWh = 0.222 Mtep, à la production indépendamment de la source. Une nouvelle convention internationale et adaptée récemment par l'Observatoire de l'Énergie fait varier l'équivalence selon la source: 1 TWh = pour les fossiles 0,222 tep, pour le nucléaire 0,26 tep, pour les sources directement mécanique (éolien, hydraulique) 0.086 tep Dans ce document nous essayerons de séparer le plus possible les bilans électriques et chaleur. Lorsque nous voulons présenter un bilan global, nous avons choisi de le présenter en "quantités d'énergie fournies à l'utilisateur" (énergie dite "finale"). Il est toutefois nécessaire de remonter aux énergies primaires charbon, pétrole et gaz utilisées pour la production d'électricité, pour calculer les rejets de CO². [Retour](#)

(2) Le terme "pays en développement" couvre en fait des situations très diverses. Certains pays comme la Chine, l'Inde ... connaissent des évolutions technologiques rapides qui leur permettraient d'adopter en théorie des solutions limitant un fort accroissement de consommation et un passage fort par les fossiles. Toutefois l'explosion démographique et les besoins en investissements les conduiront à passer partiellement par des stades technologiques moins évolués. D'autres pays, comme de nombreux en Afrique, n'ont pratiquement aucune capacité à adopter rapidement des technologies évoluées. [Retour](#)

(3) Ces données reposent sur les réserves identifiées et conventionnelles. Elles pourraient être multipliées par 2 à 3 (selon les estimations) pour prendre en compte les réserves ultimes et non conventionnelles en pétrole et gaz. [Retour](#)

(4) Nous supposons que le bilan global des mouvements d'électricité (export et import) actuellement positif sera équilibré en 2050. On pourrait aussi soutenir que, dans une Europe de la concurrence, la France a tout à fait le droit d'exporter beaucoup d'électricité nucléaire, ce qui ne peut qu'avoir un effet bénéfique pour les émissions de GES de l'ensemble du continent européen. [Retour](#)

(5) Il faut noter que la consommation de tous ces appareils se traduit en définitif par de l'énergie thermique. En hiver, celle-ci contribue au chauffage ; en été, elle peut conduire à augmenter les besoins de climatisation : il faut donc regarder les bilans de très près avant de conclure sur l'intérêt de telle ou telle mesure. [Retour](#)

(6) La part de l'électricité serait x 2.6 en comptant au niveau de la production primaire et serait supérieure au gaz. [Retour](#)

(7) Soit entre 100 et 116 TWh selon l'intégration ou non des exportations Aujourd'hui, l'hydraulique fournit 70 TWh et toutes les autres sources renouvelables confondues moins de 5 TWh : il faut donc trouver de 25 à 40 TWh supplémentaires. [Retour](#)

(8) Soit, en 2003, environ 20 TWh pour plus de 14000 MW installés. [Retour](#)

(9) Les données suivantes ont été retenues : 1 Tep charbon -> 1.17 TC ; 1 Tep pétrole -> 0.89 TC ; 1 Tep de gaz -> 0.7 4 TC. [Retour](#)

(10) Nous n'avons pas tenu compte de la séquestration possible de CO². On ne peut prévoir à ce jour si cette technologie sera opérationnelle et fortement appliquée en 2050. Au niveau France, dans ce scénario, il faudrait l'appliquer aux centrales électriques (charbon importé, séquestration à proximité des centrales)). En supposant la séquestration du CO² opérationnelle sur les centrales électriques alimentées au charbon avec un rendement de 90% , les rejets carbone seraient réduits de 31 Mt et passeraient globalement de 90 à 58 Mt (division par 2). [Retour](#)