

Diviser par 4 nos rejets : le scénario Negatep

Claude Acket Pierre Bacher

A) Introduction.....	1
B) Situation actuelle et perspectives tendancielle	2
B 1) La production	2
B 2) La consommation	3
C) Horizon 2050 et scénario “facteur 4 negatep”	4
C1) Besoins fixes des secteurs résidentiel et du tertiaire	4
C2) Besoins fixes de l’industrie et de l’agroalimentaire	6
C3) Les transports, comment réduire les besoins de pétrole ?	7
C 4) Besoins d’électricité	8
C5) Production d’électricité	10
D) Le remontage Negatep	11
E) Une approche progressive vers le facteur 4.....	12
Récapitulatif : la démarche Negatep, voie vers le facteur 4.....	13

*
* *

A) Introduction

La loi d’orientation sur l’énergie de 2005 fixe quatre grands objectifs de politique énergétique:

- Contribuer à l’indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d’approvisionnement.
- Assurer un prix compétitif de l’énergie.
- Préserver l’environnement, en particulier en luttant contre l’aggravation de l’effet de serre.
- Garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l’accès de tous à l’énergie.

Dans le cadre de cette loi, la France soutient l’objectif international de ramener de 7 à 5 GtC les émissions mondiales de gaz à effet de serre d’ici 2050, soit 0,55 tC par habitant, ce qui nécessite une division par 4 à 10 des émissions pour les pays développés¹.

La loi définit quatre grands axes pour tenter d’atteindre les objectifs fixés:

- Économiser l’énergie.
- « Décarboner » l’énergie utilisée, en réduisant la part des énergies fossiles².
- Développer les énergies renouvelables.
- Maintenir le nucléaire pour la production d’électricité.

Nous proposons ici un scénario conforme aux objectifs de la loi, en particulier de s’approcher du « facteur 4 ». Nous l’appelons « Negatep » car c’est bien la consommation d’énergie, issue en grande partie des combustibles fossiles symbolisés par le pétrole qu’il faut maîtriser. Outre les économies d’énergie, sans lesquelles le « facteur 4 » serait inaccessible, il faut remplacer le plus possible les combustibles fossiles

¹ L’Européen moyen rejette aujourd’hui entre 2 et 3 tC par an. Les Français comme les Suisses et les Suédois sont dans le bas de la fourchette grâce à une électricité produite avec très peu de combustibles fossiles. Ceci justifie que la baisse visée pour la France soit d’un facteur 4 et non 5. Les Danois ou les Allemands sont plus près de 3 tC et les Américains de 5 à 6 tC par habitant.

² La séquestration du gaz carbonique pourrait être une solution, la capture et le stockage du CO₂ permettant de diviser par 3 à 4 les rejets. La technologie en développement, pourrait s’appliquer à de grosses unités énergétiques qui à partir du charbon produiraient de l’électricité ou des carburants. Les progrès et promesses sont à suivre sous le triple aspect de la consommation d’énergie, des problèmes environnementaux liés au stockage du CO₂ et des coûts de ces nouvelles technologies.

par des sources d'énergie non émettrices de gaz carbonique, aussi bien en chaleur directe que via le vecteur électricité.

Remarques préliminaires :

1. Les formes d'énergie sont multiples (chaleur, mécanique, électricité) et se mesurent toutes avec la même unité, le Joule et ses multiples (MJ, GJ...). En pratique, cependant, les professionnels ont adopté comme unité de référence la tonne équivalent pétrole et ses multiples (tep, Mtep, Gtep) pour toutes les énergies chaleur, le kWh et ses multiples (MWh, GWh, TWh) pour l'électricité :

- 1 tep = 42 GJ
- 1 MWh = 3,6 MJ ou 0,086 tep

Bien que l'électricité et la chaleur ne rendent pas les mêmes services, les divers organismes internationaux et nationaux qui s'intéressent à l'énergie sont convenus d'exprimer les énergies mises à la disposition des utilisateurs, dites « **énergies finales** », en tep, qu'elles soient sous forme de chaleur ou d'électricité. C'est cette convention que nous adopterons très généralement ici, puisque notre propos vise essentiellement les évolutions de la consommation et des moyens d'y répondre.

En revanche, lorsqu'on s'intéresse aux rejets de CO₂, il faut évidemment remonter aux tonnes de combustibles fossiles effectivement utilisées, un peu supérieures aux quantités finales dans le cas de l'utilisation directe sous forme de chaleur (pour le pétrole, par exemple, il faut tenir compte de l'énergie consommée pour le raffinage), mais 1,5 à 3 fois supérieure dans le cas de l'électricité (pour tenir compte du rendement thermodynamique de la production d'électricité à partir de chaleur, compris entre 33 et 60 %). Une fois déterminées ces quantités d'énergies dites « primaires », on calcule les quantités de CO₂ rejetées (exprimées en tonnes de carbone contenu (tC et ses multiples)) en appliquant les coefficients :

- Pétrole : 1 tep donne 0,89 tC
- Charbon : 1 tep donne 1,17 tC
- Gaz naturel : 1 tep donne 0,74 tC

2. L'ambition de cette note se limite à l'évaluation d'ordres de grandeur des différents facteurs intervenant dans le « mix énergétique » et les rejets de CO₂. Aussi peut-il paraître paradoxal de donner chiffres significatifs alors que le premier est, parfois, lui-même incertain. Le lecteur comprendra que le seul intérêt du second est d'éviter les erreurs d'arrondis dans les sommes effectuées pour chaque énergie et pour chaque usage mais que, in fine, seuls les ordres de grandeur sont à retenir.

B) Situation actuelle et perspectives tendancielle

B 1) La production

Pour répondre aux besoins de consommation, la production énergétique française en 2000 faisait appel à 127 Mtep de chaleur directe et 450 TWh d'électricité.

- Les 127 Mtep de chaleur directe venaient essentiellement des combustibles fossiles pour 116 Mtep (76 Mtep de pétrole, 33 Mtep en gaz, 7 Mtep en charbon) auxquels s'ajoutaient 11 Mtep de diverses sources renouvelables (bois, déchets...)
- Aux 450 TWh d'électricité répondant aux besoins nationaux se rajoutaient 75 TWh exportés³. Le total de 525 TWh électrique, est produit comme suit:
 - nucléaire 400, hydraulique 70, bois déchets 4
 - charbon 30, gaz 20 (ces deux derniers rejetant du gaz carbonique).

Ceci donne pour le bilan global chaleur et électricité des rejets annuels de **115 Mt** de Carbone (MtC). C'est cette valeur qui doit être divisée par 4

³ Compte tenu de l'augmentation de la consommation électrique, ce bilan d'échange d'électricité ne devrait pas rester positif longtemps. Il pourrait même devenir négatif, sauf mise en service à court terme, de nouvelles installations basées sur les combustibles fossiles.

B 2) La consommation

La consommation en 2000 comptabilisée en énergie finale, s'est répartie par secteur comme suit:

- l'habitat individuel 31 %,
- le tertiaire 14 %,
- l'agroalimentaire 6 %,
- l'industrie 19 %
- et les transports 30 %. Il faut toutefois souligner, point important dans la démarche facteur 4, que le seul secteur du transport représente plus de 40 % des rejets de CO₂. La mobilité repose en effet pratiquement en totalité sur le pétrole, alors que les autres secteurs associent aux fossiles, d'autres sources non émettrices de gaz carbonique.

Le schéma 1 permet de voir comment cette consommation a évolué ces dernières années à partir d'un indice 100 en 1960. On notera la corrélation avec l'évolution du PIB atténuée par une amélioration de l'efficacité énergétique. On notera aussi que la consommation énergétique et le PIB ont cru moins rapidement, lors des années des chocs pétroliers et des prix élevés du pétrole et du gaz. Toutefois depuis 1990 la reprise est flagrante. Les accroissements annuels par secteur sont en moyenne ces dernières années de:

- habitat et tertiaire + 1.2 %,
- industrie + 0.8 %,
- transport + 1.4 %.

Le scénario dit tendanciel prolonge ces tendances. Il aboutirait à un accroissement de la consommation de plus de 50 % d'ici 2050.

Pour aboutir au facteur 4, il faut impérativement s'écarter de cette tendance et après inflexion atteindre une courbe descendante. On notera cependant que l'on ne passera pas du jour au lendemain d'une croissance à une décroissance de la consommation : la loi de 2005 en a d'ailleurs tenu compte en visant, de façon réaliste, un maximum autour de 2015.

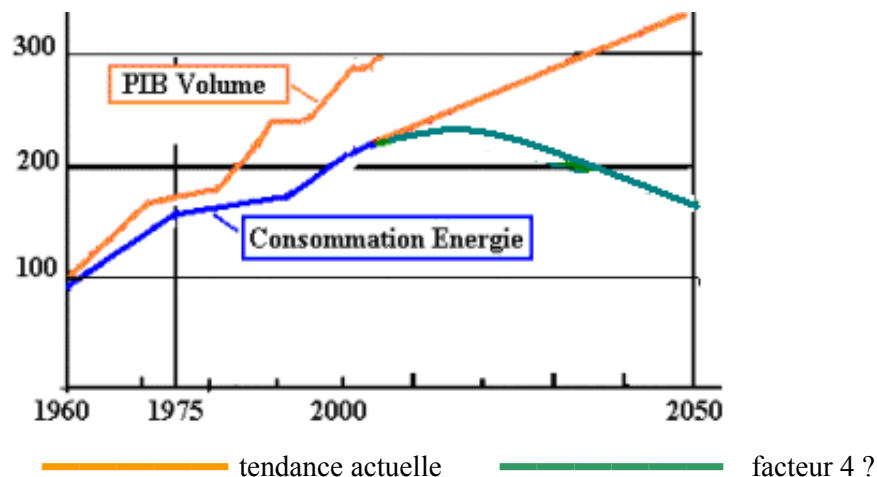


Schéma 1 – évolution de la consommation d'énergie

Ce même suivi dans le temps appliqué aux rejets de gaz carbonique, donne le schéma 2 :

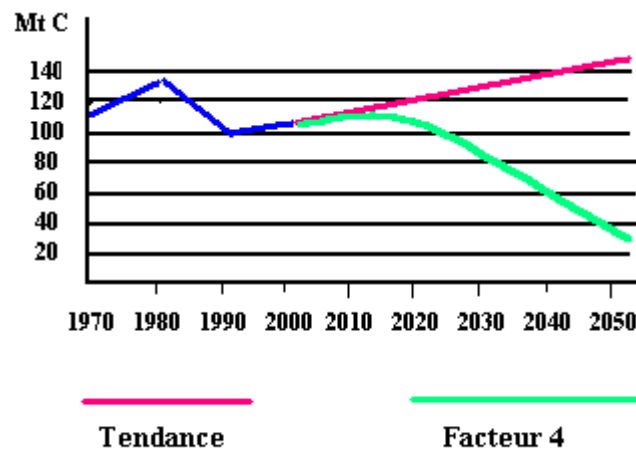


Schéma 2 : évolution des émissions de CO2

Nous constatons que l'augmentation, continue jusqu'aux années 70, s'est inversée au début des années 80. Cette inversion est autant une conséquence des chocs pétroliers (à partir de 1973) et de la crise économique qui a suivi, que de la mise en service des centrales nucléaires des années 80. Les rejets sont repartis à la hausse en 1990, à un rythme moindre qu'avant la crise, grâce aux progrès réalisés, notamment dans l'industrie. On mesure le chemin à faire pour arriver au facteur 4 : d'abord stopper l'augmentation des rejets, puis les réduire massivement. Il est évident que plus l'on tarde, plus l'effort demandé sera important.

C) Horizon 2050 et scénario "facteur 4 negatep"

La problématique aussi bien pour les mesures d'économie, que pour les choix des technologies à utiliser pour limiter les rejets de gaz carbonique, étant la même pour les besoins fixes d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire, nous les traiterons ensemble. Il en va de même pour les secteurs industriel et agroalimentaire. Puis nous aborderons globalement les besoins d'énergie dans les transports.

CI) Besoins fixes des secteurs résidentiel et du tertiaire

Situation et tendance

Nous avons vu que les usages fixes de l'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire représentent à eux deux 46 % des besoins énergétiques totaux, se décomposant de la façon suivante :

- besoins de chaleur directe (59 Mtep en 2000)
 - combustibles fossiles : 39 Mtep
 - renouvelables (essentiellement le bois) : 10 Mtep.
 - électricité pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire 122 TWh d'électricité (soit un appoint thermique équivalent de 10 Mtep)
- besoins d'électricité pour les utilisations spécifiques de ce vecteur, comme l'éclairage, le froid, les lavages, les motorisations diverses (ascenseurs...), les produits bruns (télévisions, ordinateurs...). L'énergie utilisée qui n'est pas remplaçable par des sources de chaleur directes, aussi se transformera en chaleur : 167 TWh

La poursuite de la tendance actuelle (+ 1,2 % par an) porterait la consommation de chaleur directe à 95 Mtep, pour l'essentiel toujours à partir de combustibles fossiles et d'électricité spécifique à 270 TWh

Economies possibles

Les économies d'énergie sont essentielles et possibles dans le résidentiel et le tertiaire sur la base de technologies éprouvées dont l'usage doit être étendu et aussi par des évolutions comportementales de chacun et de la société. 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 ces dernières années, la consommation globale a continué d'augmenter, en dépit des progrès en isolation pendant cette même période. Cette augmentation globale est due en grande partie à l'accroissement de la taille des logements et des m² par habitant.

Le vieillissement de la population contribue et contribuera encore plus à faire relever les températures moyennes de confort et donc à augmenter la consommation d'énergie (1°C représente 8% de plus de consommation) 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).

Les gains apportés par les normes les plus récentes, devraient permettre à l'avenir de compenser les facteurs de hausse évoqués. Par exemple, dans l'habitat ancien, souvent mal isolé et avec des chaudières peu efficaces, on estime que la seule rénovation des huisseries et des fenêtres permettrait d'économiser 7 à 8 Mtep, et la rénovation des chaudières, autant. Soit, au total, près de 15 Mtep. Les dépenses correspondantes seraient rapidement amorties aux prix actuels des différentes énergies, ce qui devrait faciliter leur mise en œuvre.

Nous avons estimé, compte tenu des progrès déjà réalisés, des constantes de temps très longues de mise en œuvre des améliorations dans l'habitat, que les besoins de chaleur, même si théoriquement les normes annoncent un facteur 4, ne seraient divisés que par 2 par rapport à la tendance. La consommation se limiterait à 47 Mtep. L'économie par rapport à la tendance serait de 47 Mtep (50 %) et par rapport à 2000 de 12 Mtep.

Pour l'électricité spécifique, les appareils vont encore se multiplier, surtout dans les foyers modestes encore sous équipés. Mais les progrès technologiques peuvent apporter des gains considérables (ex: les lampes à basse consommation, nouveaux réfrigérateurs, puissance des veilles ...) Conjointement aux améliorations des comportements individuels et sociétaux, la consommation de l'électricité spécifique, doit pouvoir être stabilisée, voire légèrement diminuée à 150 TWh. L'économie par rapport à la tendance serait de 120 TWh (45 %) et par rapport à 2000 de 17 TWh (10 %).

Remplacement des combustibles fossiles

Les économies visées, ci dessus, si elles permettent de voir une première baisse des rejets, sont largement insuffisantes, si la répartition des sources d'énergie, n'est pas profondément modifiée. Or les énergies renouvelables trouvent ici leur domaine de prédilection. Elles peuvent apporter une contribution de chaleur, très importante :

- Le bois et les divers déchets agricoles et ménagers, qui fournissent déjà près de 10 Mtep, pourraient facilement en fournir le double en chauffage individuel et surtout collectif à condition de développer les réseaux de chaleur (20 Mtep).
- Le solaire thermique pourrait facilement fournir les $\frac{3}{4}$ de l'eau chaude sanitaire dans une grande partie des logements ainsi qu'une part significative mais plus limitée du chauffage des locaux. Au total, il pourrait apporter une contribution de 9 à 10 Mtep.

- Une forte extension est à prévoir pour la géothermie de surface⁴, basée sur l'utilisation de pompes à chaleur. Ceci pourrait se généraliser dans le tertiaire et s'étendre aussi pour partie aux maisons individuelles. La contribution peut être estimée à 9 Mtep : 7 tirés du sol et 2 apportés indirectement par les pompes à chaleur (ceci suppose une fourniture associée de 25 TWh d'électricité).
 - La géothermie semi profonde ou profonde, encore peu développée (0.2 Mtep) devrait s'étendre.
- Au total, ce sont environ 36 Mtep de chaleur qui peuvent être produits par les renouvelables.

Une partie des sources d'énergie renouvelable étant destinée à l'industrie et à l'agroalimentaire (voir C2) et une autre à la production d'électricité⁵ (voir C5), globalement, ce sont 29 Mtep qui pourraient être fournies par les renouvelables chaleur, pour ces secteurs résidentiel et tertiaire. Les 18 Mtep restant devraient être fournis par 8 Mtep de gaz naturel (le charbon et le fioul domestique étant abandonnés⁶) et par 10 Mtep d'électricité. Le facteur 4 serait ainsi dépassé dans ce secteur, les combustibles fossiles étant ramenés de 39 à 8 Mtep. On notera toutefois que l'électricité serait le terme de bouclage, en plus ou en moins en fonction des réussites plus ou moins grandes des politiques d'économie d'énergie et de développement des énergies renouvelables.

C2) Besoins fixes de l'industrie et de l'agroalimentaire

Les usages thermiques directs en 2000 représentent 28 Mtep, essentiellement les combustibles fossiles pour 27 Mtep et seulement 1 Mtep de renouvelables (bois, déchets) Il faut ajouter 150 TWh d'électricité en partie pour les usages liés aux processus industriels (moteurs, électrochimie...), et en partie pour des usages spécifiques et de chauffage identiques à ceux de l'habitat.⁷ L'industrie a fait un gros effort, après les chocs pétroliers des années 70, pour améliorer son efficacité énergétique comme le montre le schéma 3 de l'évolution de l'intensité énergétique⁸. Peut-on encore espérer des gains ? La réponse est probablement oui, mais de moindre importance, car le plus important semble avoir été fait de 75 à 90 avec un gain de 25% sur 15 ans.

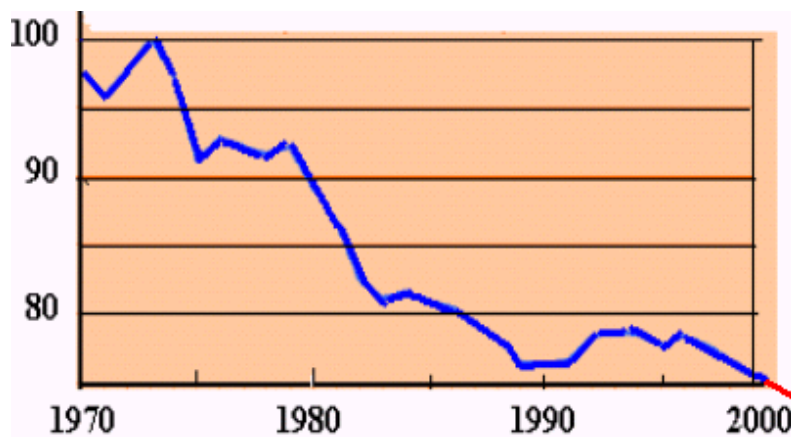


Schéma 3 : évolution de l'intensité énergétique dans l'industrie

⁴ La chaleur dite de « géothermie de surface » provient soit de la nappe phréatique, soit du soleil qui chauffe le sol où on enfouit des réseaux de récupération. Les systèmes puisant la chaleur dans l'air, bien que moins efficaces, méritent aussi d'être mentionnés, car plus faciles à installer.

⁵ Sur les 20 Mtep fournis par le bois, nous évaluons à 5 Mtep la partie pouvant alimenter des réseaux de chaleur avec cogénération,, fournissant 4 Mtep de chaleur et 1 Mtep d'électricité

⁶ Le charbon parce qu'on imagine mal son retour en grâce compte tenu de toute la logistique qu'il nécessite ; le fioul domestique parce que le pétrole, de plus en plus rare et cher, devra être réservé en priorité aux transports.

⁷ Faute de données plus précises, nous retenons la même répartition que dans le résidentiel et tertiaire entre les usages de l'électricité pour la chaleur et pour les usages spécifiques (40 – 60).

⁸ Avant les chocs pétroliers entre 1973 et 1979, la consommation d'énergie par l'industrie augmentait pratiquement de 1 % pour 1 % d'augmentation de la valeur des produits. L'accroissement du prix de l'énergie de 73 à 80 a conduit à valoriser les économies d'énergies. Dès 90, l'effort s'est estompé avec le retour d'un pétrole bon marché.

Le scénario tendanciel (+ 0,8 % par an), conduirait en 2050, à 39 Mtep et 210 TWh d'électricité. Nous avons admis que des efforts supplémentaires tenant compte d'une croissance raisonnable du PIB et d'une amélioration de l'efficacité énergétique devraient permettre de réduire ces besoins de - 33 % par rapport à la tendance et - 10 % par rapport à 2000. Toutefois la tendance forte de ces dernières années, qui ne peut que s'accroître est l'accroissement de la part de l'usage de l'électricité dans les processus industriels y compris pour la simple fourniture de chaleur. Ceci nous conduit à miser sur

- Une forte diminution de 23 Mtep par rapport à la tendance, pour ramener la consommation à 16 Mtep de chaleur directe dont 6 venant des renouvelables (- 60% par rapport à la tendance et - 43 % par rapport à 2000).
- Une augmentation de 150 à 240 TWh d'électricité soit un peu plus que la tendance, mais qui ne compense que très partiellement la baisse vue ci-dessus en chaleur directe.

Ces évolutions sont résumées dans le tableau suivant :

	2000	2050 « tendance »	2050 « negatép »
Chaleur hors électricité (Mtep)	28	39	16
Électricité chaleur (TWh)	60	85	100
Électricité spécifique (TWh)	90	125	140

C3) Les transports, comment réduire les besoins de pétrole ?

Situation, économies possibles

Le transport des biens et des personnes utilise aujourd'hui presque exclusivement le pétrole et il n'existe pas à court terme de véritables énergies de substitution disponibles. Certes, des progrès technologiques importants ont permis d'améliorer fortement l'efficacité des moteurs automobiles. Une voiture neuve de 2003 émet 20 g de moins de CO₂ que la neuve de 1995 (gain 12%)⁹. Mais cette amélioration a été plus que compensée par l'imposition de normes plus sévères de sécurité et anti-pollution hors CO₂, par l'orientation du public vers des véhicules plus puissants et par l'augmentation du trafic automobile. Par rapport à la tendance (+ 1,4 % par an), qui conduirait à 85 Mtep en 2050, on peut toutefois espérer la poursuite et la généralisation des progrès technologiques¹⁰.

Mais il faut surtout compter sur la mise en valeur des transports en commun et une modification du comportement de chacun pour permettre de stabiliser les besoins au niveau actuel, soit 50 Mtep.

Et donc une économie par rapport à la tendance de 40 %

Remplacer le pétrole

On pourrait remplacer le pétrole par des combustibles synthétiques produits à partir du charbon (CTL) ou du gaz (GTL). Hormis la mise en place généralisée de la séquestration de CO₂, ces voies ne modifient pas fondamentalement la situation vis à vis de l'effet de serre et de l'obtention du facteur 4.

Deux autres voies de substitution au pétrole peuvent être explorées : les biocarburants et l'électricité.

⁹ Les progrès réalisés vis à vis de l'environnement sont beaucoup plus importants pour les autres polluants (NO_x, HC, particules..) avec pour certains des gains d'un facteur 10. Mais souvent les gains sur ces autres polluants se font au détriment des rejets de CO₂

¹⁰ Dans la continuité : notamment l'injection directe et haute pression, la distribution variable, l'accroissement de la puissance spécifique (Downsizing)

Les biocarburants

Une directive européenne fixe un objectif de 5,75 % de biocarburants en 2010, soit, pour la France, 2,8 Mtep. Les filières actuelles dites de 1^{ère} génération, basées sur l'agriculture classique européenne, à partir de la betterave, du blé, du colza... sont peu développées à ce jour mais peuvent l'être davantage et devraient permettre d'atteindre cet objectif. Mais cette production nécessite un apport extérieur d'énergie, et, en prenant en compte l'énergie (fossile à ce jour) consommée pour les produire, le chiffre réel net est nettement moindre et peut être estimé à 1.5 Mtep. Aller fortement au-delà semble problématique. Il faudrait importer la matière première¹¹, car les ressources agricoles sont limitées et très vite la mobilité va entrer en compétition avec l'alimentaire. La limite en net serait, hors importations, comprise entre 3 et 5 Mtep.

Heureusement, des capacités potentielles nouvelles s'offrent avec les espoirs basés sur la valorisation de la biomasse lignocellulosique (biocarburants de 2^{ème} génération) et en faisant appel dans les procédés de fabrication à des sources externes d'énergie¹². Leur faisabilité technico-économique devra être cependant très sensiblement améliorée. On pourrait ainsi produire 15 Mtep à partir de 5 Mtep de biomasse, en fournissant 10 Mtep d'énergie externe, ne provenant ni de la biomasse elle-même, ni des énergies fossiles émettrices de CO₂, ce qui ne laisse guère comme choix, que l'électricité (115 TWh).

L'électricité

Au-delà des biocarburants, qui ne suffiront pas pour approcher le facteur 4, reste la possibilité de faire appel à l'électricité, sous réserve que celle-ci ne soit pas produite à partir de combustibles fossiles. Cette utilisation peut être directe, dans les transports en commun (train, tramways, métros...) mais aussi s'étendre aux transports individuels grâce au développement des batteries via les véhicules 100 % électrique ou hybrides rechargeables. Les véhicules 100 % électrique peuvent répondre aux besoins de ville ou para urbain (typiquement le deuxième véhicule). Les véhicules hybrides rechargeables peuvent se contenter de batteries de plus faible capacité : avec une autonomie de 100 km, on devrait pouvoir assurer la plupart des déplacements journaliers qui, en moyenne, ne dépassent pas 40 km, en ne consommant pratiquement que de l'électricité. Au total, avec les véhicules électriques et hybrides, ce sont l'équivalent de 20 Mt de pétrole qui devraient pouvoir être remplacés par 85 TWh d'électricité.

C 4) Besoins d'électricité*Situation actuelle et tendance court terme*

En 2002, 90 % de l'électricité était produite par des sources non émettrices de CO₂. Le reste 50 TWh était produit par du gaz, du fuel ou du charbon essentiellement pour répondre à des besoins de pointes ou très localisés.¹³ Depuis 2002 la tendance est à l'accroissement de l'utilisation des combustibles

¹¹ C'est la voie choisie par la Suède, qui importe du Brésil 95 % de l'éthanol nécessaire pour remplacer le carburant automobile.

¹² Dans le cas de la 2^o génération par exemple, le rendement massique (rapport masse équivalent pétrole produit sur masse sèche initiale) est à ce jour compris entre 15 % et 20 %. En faisant appel à d'autres sources d'énergies externes (allothermie) des rendements au-delà de 40 % peuvent être espérés. Cet apport d'énergie externe se traduirait de la façon suivante : au lieu de produire 1 tep en consommant une partie de la biomasse pour fournir la chaleur nécessaire, on pourrait produire, à partir de la même quantité de biomasse, 2 à 2,5 tep de biocarburant en apportant 1 à 1,5 tep d'énergie extérieure (par exemple 11 à 17 MWh d'électricité)

¹³ Les rejets supplémentaires annuels seraient de 120 Mt de carbone si l'électricité était produite par du charbon mais seulement 50 Mt si elle était produite à partir du gaz avec cycle combiné, chiffres à comparer aux rejets actuels de 115 MtC. L'augmentation récente du prix du gaz, qui ne peut que s'accroître d'ici 2050 conduit à penser que seul restera en piste le charbon, avec l'espoir de la séquestration.

fossiles, en partie due à la baisse de l'hydraulique mais aussi à la hausse des besoins. Cet appel aux énergies fossiles va s'accroître dans les années et ceci, apparaît clairement dans le PPI (Plan Pluriannuel des Investissements de la production électrique) qui prévoit d'ici 2015 des équipements supplémentaires de 6.100 MW de fossiles, 13.000 MW¹⁴ d'éolien et 1.600 MW pour une tranche EPR. Globalement les rejets de CO2 vont donc augmenter. Il faut espérer que d'ici 2020, les moyens seront mis en œuvre pour corriger cette tendance contraire à l'objectif de la loi.

Tendance à long terme 2050

On rappellera que l'électricité utilisée aujourd'hui en France (450 TWh auxquels s'ajoutent 70 TWh exportés) se répartit comme suit :

- 122 TWh pour les besoins de chaleur dans le résidentiel et le tertiaire
- 167 TWh pour les usages spécifiques, dans le résidentiel et le tertiaire
- 150 TWh pour l'ensemble des besoins de l'industrie et de l'agriculture
- 10 TWh pour les transports (essentiellement ferroviaires)

Nous avons vu ci dessus qu'au sein de chacun de ces secteurs d'activité, la tendance est à un fort accroissement des besoins d'électricité pour approcher les 700 TWh (schéma 4).

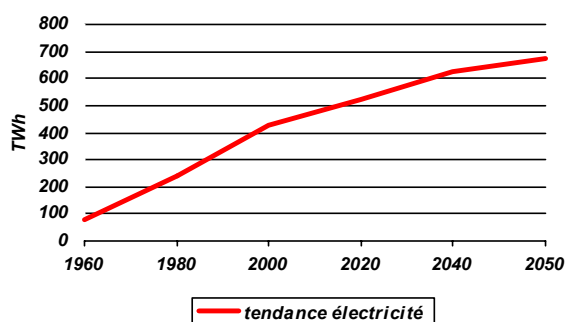


Schéma 4 – tendance d'évolution de la consommation d'électricité

Electricité, le scénario Negatep

Les besoins d'électricité dans le scénario negatep découlent des analyses précédentes, résumées dans le tableau suivant :

TWh	2000	2050 « tendance »	2050 « negatep »
Résidentiel et tertiaire			
• chaleur	122	180	115
• spécifique	167	270	150
Industrie et agroalimentaire	150	210	240
Transports			
• ferroviaires	10	15	20
• biocarburants	-	?	115
• hybrides	-	?	85
Total	450	675	725
Exportation nette	70	pm	pm

¹⁴ Équivalent à 3000 ou 4000 MW d'électricité non intermittente.

Les besoins d'électricité en 2050 dans le scénario negatop sont, au total, très proches de ce que donnerait la poursuite des tendances actuelles. Mais cette quasi équivalence s'explique par un double phénomène :

- un effort important de maîtrise de la consommation d'électricité pour les usages traditionnels de cette forme d'énergie
- un développement important de l'électricité pour se substituer au pétrole et, dans une moindre mesure, au gaz naturel.

Cette évolution est une conséquence directe de l'objectif « facteur 4 », l'électricité étant, aux côtés des économies d'énergie et des énergies renouvelables, le troisième moyen de limiter les besoins de combustibles fossiles.

C5) Production d'électricité

Pour ne pas contribuer fortement aux rejets de CO₂, l'électricité doit être produite soit avec de l'énergie nucléaire, soit avec des combustibles fossiles et séquestration du CO₂, soit à l'aide d'énergies renouvelables :

- Le nucléaire produit aujourd'hui près de 80 % de notre électricité, proportion qui pourrait être conservée sans inconvénient majeur.
- Le charbon avec séquestration du CO₂ est une des voies envisagées dans le rapport de la MIES sur le facteur 4¹⁵. Mais il faut avoir conscience que la capture et le stockage du CO₂ ne couvrent qu'environ les 3/4 du CO₂ émis¹⁶. Autrement dit, même si cette solution débouche sur le plan industriel, la production de 5 à 600 TWh avec du charbon aurait pour conséquence d'augmenter les rejets de CO₂ de 40 à 45 MtC
- Les énergies renouvelables : rappelons que la France s'est engagée à produire 21 % de son électricité à partir d'énergies renouvelables, et ceci dès 2010.
 - Aujourd'hui, l'énergie renouvelable de loin la plus importante en France est l'hydraulique, mais elle devrait peu évoluer, pratiquement tous les équipements ayant été faits. L'hydraulique joue un rôle dans la stabilité du réseau, face aux variations rapides de l'équilibre entre les besoins et la production, mais les limites semblent atteintes et l'hydraulique ne peut pratiquement plus rien apporter en cas de fort développement des sources intermittentes.
 - Le bois et les déchets carbonés peuvent contribuer un peu à la production d'électricité, notamment dans des installations de cogénération (chaleur et électricité) Ceci pourrait fournir plus de 20 TWh
 - L'éolien ne connaît un fort développement en France que depuis peu, mais le PPI de 2006 prévoit l'installation de 17 GW d'ici 2016. . En dehors de l'aspect coût, le point le plus important qui limitera l'éolien est le caractère intermittent et relativement imprévisible à court terme de la production. De façon simplifiée, il faut considérer qu'à chaque MW éolien installé doit être prévu entre 0.7 et 0.9 MW d'une autre source d'appoint disponible, souple, contrôlable qui produira donc au moins 3 fois plus d'énergie, l'idéal étant le gaz. A moins de faire jouer ce rôle au nucléaire, ce qui serait paradoxal, cette contrainte limite la quantité acceptable d'électricité intermittente. Il est aussi considéré, que pour le bon fonctionnement du réseau, la puissance intermittente qui risque de disparaître ou au contraire d'apparaître rapidement, ne doit pas dépasser 20 % de la puissance installée permanente¹⁷. Compte tenu du facteur de charge des éoliennes l'énergie apportée par les éoliennes ne pourrait guère dépasser 6 % des besoins. Ceci donnerait dans l'absolu une limite d'environ 40 TWh dans le cas d'un réseau avec beaucoup de combustibles fossiles.

¹⁵ Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, *La division par 4 des émissions de CO₂ d'ici 2050* (2004)

¹⁶ L'énergie dépensée pour le transport du charbon, puis du CO₂ (environ 10 %) rejette du CO₂ non capturé, la capture du CO₂ augmente d'environ 25 % de l'énergie dépensée par kWh, et les pertes au cours de la capture peuvent être estimées à 10 % si on ne veut pas que les procédés soient trop coûteux.

¹⁷ Le cas du Danemark, où l'éolien dépasse 30 %, est particulier car le réseau danois est relié à deux puissants réseaux, scandinave et allemand.

Dans le cas d'une forte présence du nucléaire, nous avons placé cette limite vers 20 TWh¹⁸

- L'électricité d'origine solaire photovoltaïque souffre du même inconvénient de l'intermittence que l'électricité éolienne, avec toutefois une meilleure prévisibilité des variations brusques, mais par contre une production moindre en hiver lorsque les besoins sont au maximum. Elle présente l'avantage de pouvoir être installée partout, les panneaux solaires pouvant notamment être intégrés à l'architecture des immeubles. Mais elle est encore beaucoup trop chère et devra faire de gros progrès pour être compétitive avec les autres énergies. Il est difficile de prévoir aujourd'hui si les progrès techniques joints à une hausse du prix de l'énergie seront suffisants pour permettre un développement massif de cette énergie.

Au total, on peut penser que l'électricité renouvelable pourrait à terme fournir entre 100 et 150 TWh en France, dont la moitié grâce à l'hydraulique. La valeur haute correspond à une forte présence de combustibles fossiles propres, ce qui suppose la séquestration du CO2.

Bilan global de la production électrique Negatep

Pour répondre aux besoins d'électricité, en se rapprochant du facteur 4, nous aboutissons à la répartition suivante de la production d'électricité pour un total de 725 TWh¹⁹ :

- Nucléaire 565 TWh (78 %, soit sensiblement le même pourcentage qu'en 2000)
- Hydraulique 70 TWh
- Autres renouvelables 50 TWh (bois et déchets en cogénération, éolien, divers)
- Gaz 40 TWh²⁰

D) Le remontage Negatep

Le tableau ci dessous donne pour les principaux postes de consommation, le détail des sources d'énergie et l'évolution entre 2000 et 2050

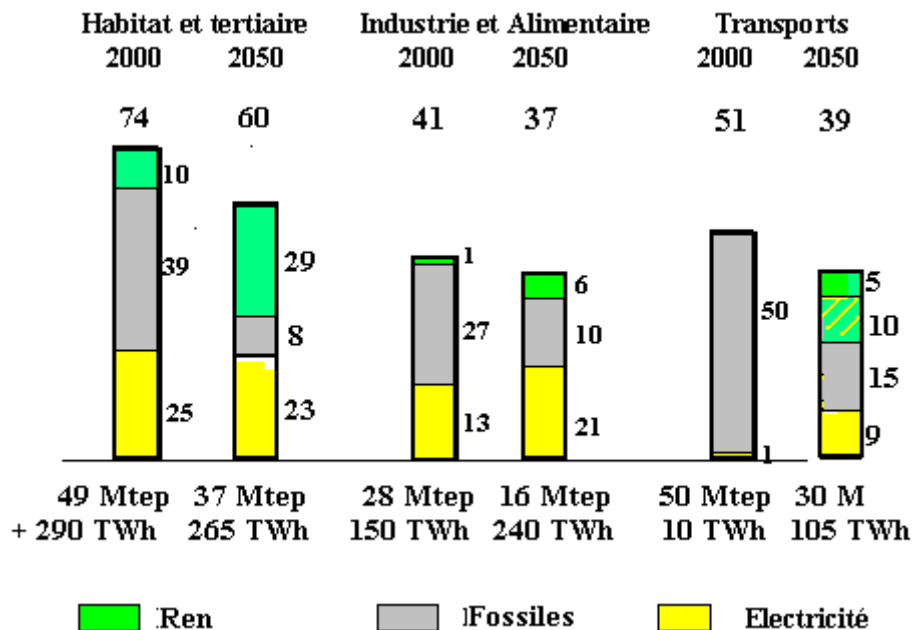
	Electricité TWh		Pétrole Mtep		Gaz Mtep		Charbon Mtep		Divers Ren Mtep		Biom pour bioc Mtep		Total Hors électr	
	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050
Logements														
• Chauffage eau chaude	122	115	17	0	21	8	1	0	10	29			49	37
• Electricité spécifique	167	150												
Ind/Alim.														
• Chaleur	60	100	9	0	12	6	6	4	1	6			28	16
• Électricité spécifique	90	140												
Transports	10	220	50	15							0	5	50	20
Total TWh	450	725												
Total Mtep	(39)	(62)	76	15	33	14	7	4	11	35	0	5	127	73

¹⁸ Le rapport qui justifie les 17 GW du PPI est plus optimiste, mais « oublie » que l'éolien va se substituer plus aux TWh nucléaires qu'aux TWh fossiles ; mais même si on retenait 40 TWh plutôt que 20, cela ne modifierait pas beaucoup les bilans globaux.

¹⁹ Auxquels il faudrait le cas échéant ajouter l'électricité exportée

²⁰ Produits avec 5 à 6 Mtep de gaz

Les diagrammes suivants montrent de façon plus globale en Mtep, en ramenant l'énergie électrique à l'équivalent chaleur en consommation finale



Nota : les 15 Mtep de biocarburants sont obtenus à partir de 5 Mtep de biomasse et 115 TWh d'électricité

Schéma 5 – récapitulatif des consommations finales

Au total la consommation de l'an 2000 représentait en chaleur finale : 166 Mtep y compris électricité. Cette consommation devient 136 Mtep en 2050, en baisse de 18 % par rapport à 2000 et de 47 % par rapport à la tendance actuelle qui conduirait à 260 Mtep.

Rejets gaz carbonique

Pour faire le bilan des rejets, nous avons négligé, par souci de simplicité, les pertes d'énergies fossiles en amont de leur utilisation finale, ce qui conduit à sous estimer les rejets de quelques %. Pour la production d'électricité, nous avons adopté un rendement uniforme de 40 %, cote mal taillée entre les centrales au charbon ou fioul, les centrales à gaz en cycle direct et celles en cycle combiné. Ces hypothèses donnent en ordre de grandeur les rejets suivants par MWh électrique selon l'énergie utilisée pour le produire :

- 0,22 tC pour le pétrole
- 0,26 tC pour le charbon (en l'absence de séquestration du CO₂)
- 0,16 tC pour le gaz naturel

Le remontage Negatep conduit à un rejet final calculé de 35 Mt de carbone, chiffre probablement un peu sous-estimé. Il est probable que l'on serait plus près d'un facteur 3.

E) Une approche progressive vers le facteur 4

Il faut évidemment se poser la question du cheminement qui permettrait d'aller vers le facteur 4 : de quels développements a-t-on besoin, quels sont les risques d'échec, et « last but not least », quelles devraient être les incitations ou sanctions financières pour que les différents acteurs jouent le jeu. ? Nous n'aborderons ici ces points que très succinctement.

Pour les usages fixes de l'énergie, les mesures d'économie d'énergie sont connues et sont très souvent compétitives dès que le prix du pétrole dépasse durablement 50 à 60 \$/baril ; les difficultés de mise en

œuvre généralisée proviennent très globalement des problèmes logistiques et des constantes de temps très importantes, en particulier en ce qui concerne l'habitat et les habitudes de vie. Mais rien ne semble empêcher une mise en œuvre progressive, à un rythme qui dépendra effectivement du prix de l'énergie et des efforts de mobilisation de la profession.

Dans le domaine du transport, il faut distinguer la maîtrise de la consommation, le développement des biocarburants et l'utilisation directe de l'électricité :

- les progrès en matière de motorisations et le développement des transports en commun devraient permettre une stabilisation progressive des consommations.
- les biocarburants de première génération, produits à partir du sucre, de l'amidon ou de l'huile contenus dans les plantes, sont limités par les surfaces de cultures disponibles en France et en Europe, et ne pourraient guère dépasser 5 Mtep, sauf si on décidait d'importer massivement la matière première (ce que la Suède a commencé à faire). Les carburants de deuxième génération, produits à partir des produits ligno-cellulosiques et avec un fort apport d'énergie, ne verront le jour que si les programmes de recherche engagés débouchent sur des procédés industriels viables économiquement ; on estime généralement qu'il faudrait que le prix du pétrole dépasse durablement 100 \$/baril.
- L'utilisation directe de l'électricité pourrait commencer assez rapidement dans des véhicules hybrides à batteries rechargeables ; les développements récents permettent d'espérer pouvoir disposer de batteries assurant une autonomie proche de 100 km, mais le prix reste une inconnue. Le développement de voitures tout électriques bute encore sur le problème des batteries.

En définitive, on peut espérer faire une partie du chemin au cours des prochaines décennies, mais il subsiste des incertitudes sur la possibilité d'atteindre le facteur 4.

En ce qui concerne la production d'électricité, il n'y a pas d'incertitude quant à la faisabilité du développement du nucléaire, de l'éolien et de la cogénération. Leur introduction est une question de programmation prenant en considération, pour le nucléaire, la durée de vie des centrales existantes, pour la cogénération, le développement de réseaux de chaleur et, pour l'éolien, les problèmes d'insertion dans le réseau d'une électricité intermittente. Seul le solaire photovoltaïque reste incertain, compte tenu de son coût environ 10 fois supérieur à celui des autres sources d'électricité ; mais 2050 est suffisamment loin pour que l'on puisse espérer que la recherche et le développement apportent des progrès suffisants pour permettre son développement.

En définitive, il semble possible d'aller très progressivement dans la bonne direction, sans aléas techniques graves. Le coût est plus incertain, mais il semble qu'avec un prix du pétrole durablement compris entre 50 et 100 \$/baril, un grand nombre des mesures envisagées soient économiquement viables.

Récapitulatif : la démarche Negatep, voie vers le facteur 4

Le schéma ci dessous résume la démarche ayant abouti au scénario Negatep facteur 4.

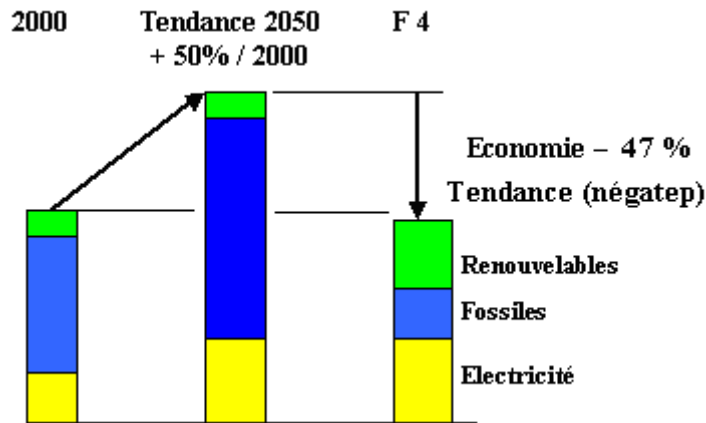


Schéma 6 – résumé de la démarche negatop

En partant de la situation en 2000, nous avons examiné sur la base des tendances actuelles le paysage énergétique en 2050. Il s'agit d'une approche dans la continuité, sans mise en œuvre de mesures spécifiques forcées qui seraient consécutives à une flambée des coûts du pétrole et du gaz, ou sans mise en œuvre de mesures volontaires pour limiter les rejets de CO₂ et les conséquences sur l'effet de serre.

Nous avons regardé ensuite les économies réalisables, acceptables par la population, sous l'aspect coût et sans bouleversement profond des modes de vie. Globalement ce sont 40 % qui peuvent être économisées par rapport à la tendance, en baisse de 18 % par rapport à 2000 (mais en réalité, de près de 30 % par rapport au maximum de consommation qui devrait se situer vers 2015²¹).

Pour réduire significativement les rejets il faut impérativement réduire l'emploi des combustibles fossiles. En France sont concernés à ce jour le pétrole et le gaz, car le charbon est peu utilisé depuis notamment son remplacement par le nucléaire dans les centrales électriques. Toutefois cette situation pourrait changer avec l'accroissement prévu du prix du pétrole et du gaz et un fort retour du charbon serait possible. Il serait rigoureusement incompatible avec une diminution des rejets en l'absence de séquestration du CO₂, et conduirait probablement à un facteur proche de 2 avec séquestration.

Nous avons examiné ensuite les possibilités offertes par les énergies renouvelables. L'hydraulique et le bois placent la France en bonne position dans l'emploi des renouvelables par rapport aux autres pays européens. De fortes avancées sont possibles pour les renouvelables thermiques dont le bois (part multipliée par 2), le solaire thermique, la géothermie et les biocarburants produits en utilisant une énergie externe non émettrice de CO₂. Globalement l'ensemble de ces sources thermiques pourrait être multiplié par presque 5 et ainsi contribuer pour un peu plus d'1/3 à la production énergétique contre 6.6 % seulement actuellement. Il s'agirait d'une forte avancée.

Mais, économies d'énergie et renouvelables ne suffisent pas. Pour remplacer le pétrole et le gaz, il faut aussi leur substituer l'électricité, ces usages nouveaux de l'électricité venant plus que compenser les économies réalisables dans ses usages traditionnels. Au total, les besoins d'électricité augmenteraient de 60 %, prolongeant de fait, mais pour d'autres causes, la tendance actuelle. Condition impérative, cette électricité doit être produite sans augmenter les émissions de CO₂. Les renouvelables participeront à cette croissance (+ 50 TWh) en complément de l'hydraulique déjà bien présent, mais qui a pratiquement atteint ses limites. Ce sera surtout le nucléaire qui sera l'élément déterminant dans l'approche du facteur 4, avec une production augmentée de presque 40 %.

Les moyens existent aujourd'hui pour amorcer la démarche « facteur 4 » et pour progresser de manière très significative. Pourra-t-on atteindre le facteur 4 ? Lorsqu'on approche de valeurs d'émissions aussi basses, on ne peut plus se contenter de raisonner en ordres de grandeur. Il faudrait, par exemple, tenir

²¹ A condition de s'y mettre vraiment sans tarder.

compte en détail des différents modes de transport, notamment aérien ; et entrer dans le détail des énergies consommées pour produire et transformer la biomasse. Bref, le facteur 4 risque d'être difficile à atteindre, mais beaucoup peut être fait pour aller dans la bonne direction et nul n'est besoin d'attendre pour commencer.