



Février 2010

Scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour la France

Projet EnCiLowCarb
Engaging Civil Society in Low Carbon pathways

Sandrine Mathy
Ruben Bibas

(CIRED – Centre International de Recherche sur
l'Environnement et le Développement)

Meike Fink
(RAC-F – Réseau Action Climat - France)

Low Carbon Societies Network





Le CIRED a été fondé en 1973 par le Professeur Ignacy Sachs à l'EHESS pour étudier les tensions entre environnement, gestion à long terme des ressources naturelles et développement économique. Il s'attacha, durant les années soixante-dix, à l'élaboration de la problématique de l'éco-développement qui vise à résorber et prévenir ces tensions par un jeu sur trois groupes de variables : les styles de consommation, les choix technologiques et l'aménagement de l'espace.

Aujourd'hui les recherches du CIRED continuent de donner toute priorité à l'étude des relations entre les modes de régulation économique et la genèse des univers techniques qui structurent les rapports entre les activités humaines et l'environnement biophysique naturel et construit.

Il s'agit d'appréhender comment les institutions, les incitations économiques et les conventions sociales formatent les choix techniques et les styles de consommation, puis d'étudier les rétroactions économiques et sociales de leurs impacts environnementaux.

C'est une Unité Mixte de Recherche (UMR 8568) dépendant de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, du Centre National de la Recherche Scientifique, de l'École des Ponts ENPC, de AgroParisTech-ENGREF et du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). En 2006, Météo-France s'est liée au CIRED à travers une convention de recherche.



Le Réseau Action Climat - France (RAC-F) est une association spécialisée sur le thème des changements climatiques, regroupant 14 associations nationales de défense de l'environnement, de la solidarité internationale, d'utilisateurs de transport et d'alternatives énergétiques. Les missions du RAC-F sont :

- Participer aux négociations internationales sur le climat;
- Informer sur le changement climatique et ses enjeux;
- Suivre les engagements et les actions de l'Etat et des collectivités locales en ce qui concerne la lutte contre l'effet de serre;
- Proposer des politiques publiques cohérentes avec les engagements internationaux de stabilisation d'émissions de la France pris à Kyoto.

AUTEURS

Sandrine Mathy (CIRED), Ruben Bibas (CIRED), Meike Fink (RAC-F)

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Henri Prévot, Bertrand Château, Thierry Salomon et Yves Marignac pour le temps qu'ils ont accordé pour la compréhension et l'analyse de leurs travaux.

Cette analyse a été réalisée dans le cadre du projet ENCI-LowCarb financé par le 7^{ème} programme recherche de la Commission Européenne.

DECLARATION DE RESPONSABILITE

Les conclusions, interprétations et recommandations sont celles des auteurs de ce rapport et ne doivent pas être attribuées à la Commission Européenne. Toute erreur est de la responsabilité des auteurs.

Pour plus d'informations sur le projet ENCI-Lowcarb

<http://www.lowcarbon-societies.eu>

RESUME

1. En France, l'objectif de la communauté internationale de maintenir le réchauffement climatique moyen en deçà de 2° s'est traduit dans la loi par un objectif de Facteur 4, soit une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2050 par rapport à 1990.
2. Plusieurs exercices de modélisation ont élaboré pour la France des scénarios ou projections de mix énergétiques dans ce sens :
 - « NégaWatt » – 2006
 - « Négatep » – 2006
 - « La division par 4 des émissions de CO₂ en France d'ici 2050 » MIES - 2004
 - « Politique énergétique nationale et lutte contre l'effet de serre » - Henri PREVOT - 2004
 - « Etude pour une prospective énergétique concernant la France » Observatoire de l'Energie, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières – ENDERDATA, LEPII – 2005
 - « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », Centre d'analyse stratégique, Commission énergie - Jean Syrota - 2007
3. Nous avons mené une analyse critique détaillée de ces exercices portant sur : les méthodologies de modélisation utilisées, les hypothèses économiques ou technologiques sous-jacentes, les mesures de réduction d'émissions représentées ainsi que le détail des trajectoires et orientations technologiques et énergétiques qui en résultent.
4. Tout d'abord, **ces scénarios prennent en compte les seules émissions de CO₂ énergétiques, soit 75% des émissions actuelles françaises.** Ceci est à prendre en considération pour les futurs exercices de modélisation. Il est en effet probable que les politiques et mesures climatiques visant les émissions de CO₂ énergétiques aient un impact sur les 25% restantes. Par exemple, la limitation des transports de marchandises pouvant pousser à une relocalisation de la production alimentaire et donc tirer à la hausse les émissions agricoles par exemple.
5. Les **méthodologies de modélisation utilisées** sont pour la plupart **assez sommaires** et relevant plus de l'analyse de données (négaWatt, négaTep, Prévot, MIES) que d'une réelle modélisation. L'établissement de ces scénarios se fait sans prise en compte de l'évolution du prix de l'énergie ou du prix du carbone nécessaire pour répondre à la contrainte. A noter que nW se place volontairement dans une démarche différente des autres scénarios : la démarche part de la notion de besoin énergétique de base. Seuls les scénarios Enerdata et ceux du rapport Syrota s'appuient sur des modèles dits *bottom-up* avec force détail technologiques. Néanmoins, ils ne donnent qu'une représentation très incomplète des contraintes et dynamiques économiques. Seul le scénario MedPro-POLES tient compte des rétroactions des politiques climatiques et du prix du carbone sur les niveaux de demandes de biens et d'énergie par exemple.

6. En matière de résultats, **aucun des scénarios n'atteint le facteur 4** en 2050 sur le segment CO2 énergétique. Le scénario le plus ambitieux est le scénario négaWatt avec un facteur 3,6; le moins ambitieux est le scénario Markal. Dans ce scénario, le processus d'optimisation du coût technologique à demande donnée ne peut se faire qu'au un prix d'une valeur du carbone suffisamment élevée pour permettre la pénétration de 90GW de capacité nucléaire.
7. Pour les **transports**, les éléments faisant débat sont la part respective
 - a. De l'électricité dans la demande finale des transports sachant que la consommation d'énergie fossile dans le secteur des transports apparaît au minimum divisée par 2.
 - b. Des perspectives d'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules conventionnels
 - c. De la maîtrise de la mobilité et du transfert modal.

Ce débat renvoie directement aux limitations des modèles utilisés pour représenter l'évolution et les bifurcations potentielles des demandes. Une autre dimension est la place des agrocarburants : de quel type, de quelle provenance, quelle compétition d'usage des sols ? L'hydrogène au travers des scénarios n'apparaît pas réellement comme une solution d'ampleur envisagée.

8. Dans le secteur des **bâtiments**, des réglementations thermiques strictes et ambitieuses pour les constructions neuves ainsi que la réalisation d'un ambitieux programme de rénovation thermique apparaissent comme incontournables pour les différents scénarios. Néanmoins, les auteurs des scénarios présentent des visions quant à la possibilité d'exploiter la totalité du potentiel dans ce domaine. Ceci est dû au rythme de rénovation des bâtiments et aux difficultés d'établir des contrôles et une obligation dans ce domaine conduisent à une dispersion des résultats pour ce secteur. Ceci est révélateur des mesures sous jacentes : incitations vs. obligation de rénovation thermique.

Un autre élément de débat renvoie à la part de l'électricité dans la consommation finale avec notamment les perspectives de déploiement du chauffage électrique approvisionné avec de l'électricité nucléaire. Le scénario qui va le plus loin dans cette option est le scénario Markal avec 70% environ de l'énergie finale du secteur consommée sous forme d'électricité (pour mémoire, aujourd'hui ce n'est que 31%). Ces solutions basées sur l'électricité s'opposent à des solutions basées sur des réseaux de chaleur, des chauffe-eaux solaires, de la cogénération individuelle. Il convient de noter dans le scénario négaWatt, la faible part de l'électricité. La seule électricité d'origine non renouvelable consommée dans ce secteur dans le scénario nW est de l'électricité cogénérée ou provenant de cycles combinés au gaz, le reste faisant appel à des sources d'énergie décentralisées.

9. C'est dans le secteur de **l'industrie**, qu'un manque d'expertise fouillée apparaît dans de nombreux scénarios, conduisant à de forts niveaux d'incertitudes. D'autre part, il est difficile de projeter les émissions du secteur industriel sans se poser la question de la compétitivité industrielle internationale et du contenu en carbone des importations, puisqu'une réglementation dans le domaine climatique en France ou en Europe peut entraîner une perte de compétitivité de l'industrie visée. Par contre, depuis que ces scénarios ont été développés, le paquet climat énergie européen fixe des objectifs de

réductions spécifiquement pour le secteur industriel à l'horizon 2020 à l'appui du système de Permis d'Emissions Négociables. Ceci limite l'enjeu de développer un travail de modélisation plus abouti pour ces secteurs.

10. Les trajectoires technologiques apparaissent donc très contrastées avec deux grands types de tendances se détachant :
 - a. D'un côté la majorité des scénarios s'appuient sur **un développement massif du nucléaire permettant d'alimenter les bâtiments en chauffage électrique¹ notamment un parc de véhicules électriques (ou hydrogènes) et éventuellement une demande croissante en électricité spécifique.**
 - b. De l'autre le scénario négaWatt s'appuie sur des gains très importants en efficacité énergétique côté à la fois demande et offre et sobriété énergétique, permettant aux ENR de prendre une place prépondérante dans le mix final.

Même si les hypothèses sur l'évolution des coûts et des politiques de soutien aux ENR sont incertaines, la production d'origine renouvelable atteint dans la plupart des cas au moins 50Mtep d'énergie finale (soit l'équivalent de la consommation de pétrole aujourd'hui), ce qui est significatif.

11. Les hypothèses retenues en termes de potentiels de réalisation de l'amélioration de l'efficacité énergétique (notamment sur les véhicules, sur les bâtiments) diffèrent beaucoup dans les 6 scénarios. De la même manière, les potentiels en termes d'évolution de la demande de mobilité et notamment d'évolution modale est très confuse avec des hypothèses difficilement palpables. D'autre part, une confusion est souvent faite entre efficacité et sobriété énergétique.
12. Au vu de l'analyse menée, nous en déduisons les caractéristiques des scénarios que nous allons développer dans le cadre du projet **EnciLowCarb** :
 - Comme pour les autres scénarios, seule prise en compte des émissions de CO2 énergétiques, émises sur le territoire. Une discussion sera néanmoins menée à chaque fois quant à l'impact des scénarios représentés i) sur le contenu en carbone de la balance commerciale et ii) sur l'évolution des émissions non CO2 et notamment du secteur agricole dans le cas de développement des agrocarburants produits au niveau national ou importés ;
 - Evaluation économique des mesures de réduction des émissions et prise en compte des rétroactions des politiques climatiques sur les niveaux de demandes grâce au modèle **Imaclin-R** : impact sur le prix de l'énergie, prix du carbone nécessaire pour répondre à une trajectoire d'émissions, impact sur le pouvoir d'achat des ménages ;
 - Description du contenu matériel de la croissance et styles de développement ;
 - Représentation fine du secteur électrique avec prise en compte de la saisonnalité des usages et de l'évolution potentielle de la courbe de charge ;
 - Description du contexte international (prix de l'énergie, développement des agrocarburants au niveau international, prix européen de l'électricité...)
 - Construction de l'acceptabilité sociale à l'aide du modèle **Imaclin-R** :
 - Représentation de la pluralité des visions quant à l'évolution technologique

¹ A noter qu'avec la nouvelle réglementation thermique RT2012, cette orientation semble compromise.

concernant les hypothèses côté demande (efficacité énergétique des équipements finaux, sobriété énergétique) et côté offre (nucléaire, CCS, l'hydrogène, *smart grid*, ENR). De manière à représenter cette pluralité nous avons choisi de repérer nos hypothèses technologiques de scénarios selon 2 axes : 1^{er} axe - niveau de centralisation de la production d'énergie (centralisé vs. décentralisé) ; 2^{ème} axe – sobriété énergétique. Le projet ENCLowcarb s'attachera particulièrement à développer un scénario « production décentralisée et sobriété élevée ».

- Concertation des parties prenantes autour des résultats des scénarios sous la forme d'un dialogue entre modélisation et partie prenante, évaluation de l'acceptabilité sociale des mesures.

Chiffres clefs :

1. Réduction des émissions entre -55% et -77% en 2050 par rapport à 2000, soit en dehors de la fourchette établie par le GIEC (entre -80 et -95% en 2050)²
2. Diminution de la consommation d'énergie finale entre -8,2% et -34,8% en 2050
3. Part des énergies renouvelables dans l'électricité entre 4% et 85%
4. Part du nucléaire dans l'électricité entre 0% et 82%
5. Production d'électricité entre 422 et 932 TWh³
6. Part de l'électricité dans l'énergie finale du transport entre 6% et 92%⁴
7. Part de l'électricité dans l'énergie finale dans le résidentiel / tertiaire entre 37% et 63%
8. Plus grand effort de réduction en moyenne pour le secteur du transport
9. Réduction sectorielle des émissions la plus forte pour le secteur résidentiel / habitat avec un facteur 8,3 atteint dans le scénario Enerdata
10. Plus importante dispersion dans les réductions d'émissions pour l'industrie : variations entre un facteur 0,8 et 6 par rapport à 2000

² GIEC, groupe III, 2007 Chapitre 13, tableau 13-7

³ En 2009, la consommation intérieure française d'électricité est de 486,4 TWh, en baisse de 1,6% par rapport à 2008, d'après RTE Réseau de Transport de l'Électricité (2010) : «Le bilan électrique français »

⁴ Par manque de données l'analyse du scénario négaWatt n'est pas intégrée

ABSTRACT

1. In France, the objective of the international community to keep global warming below 2° resulted in a legally-binding objective of Factor 4, i.e. a division by 4 of GreenHouse Gases (GHG) emissions in 2050 compared to 1990.
2. Several modeling exercises developed scenarios or energy mix projections for France with this goal:
 - « NégaWatt » – 2006
 - « Négatep » – 2006
 - « La division par 4 des émissions de CO₂ en France d’ici 2050 » MIES - 2004
 - « Politique énergétique nationale et lutte contre l’effet de serre » - Henri PREVOT - 2004
 - « Etude pour une prospective énergétique concernant la France » Observatoire de l’Energie, Direction Générale de l’Energie et des Matières Premières – ENDERDATA, LEPII – 2005
 - « Perspectives énergétiques de la France à l’horizon 2020-2050 », Centre d’analyse stratégique, Commission énergie - Jean Syrota - 2007
3. A detailed analysis of these exercises is carried out on: (i) the modeling methodologies used in these exercises, (ii) the underlying economic and technological assumptions, (iii) the represented measures to reduce emissions as well as (iv) the technological and energy paths involved to follow the specific emissions trajectories.
4. First, **these scenarios take into account only energy-related CO₂ emissions** (i.e. fossile fuels emissions) **amounting to 75% of current French emissions**. For future modeling exercises, climate policies and measures for emissions of energy-related CO₂ are likely to have an impact on the remaining 25% (the limitation of goods transport can trigger a relocation of food production and thusly increase agricultural emissions for example).
5. Most of the **modeling methodologies** used in these scenarios fall within the scope of data analysis (negawatt, négaTep, Prevot, MIES) rather than genuine modeling. These scenarios are built disregarding the changes in energy prices or the price of carbon needed to meet the constraint. The negawatt scenario takes a deliberately different approach from other scenarios: the approach follows the concept of basic energy needs. Only the Enerdata and Syrota scenarios rely on “bottom-up” models with detailed technological description. Nevertheless, they produce scenarios lacking a robust representation of economic constraints and dynamics. Only the MedPro-POLE scenario encompasses the feedbacks from climate policies and the carbon price on the levels of demand for goods and energy for instance.
6. In terms of results, **none of the scenarios reaches a factor 4 in 2050** for the energy-related CO₂ emissions. The most ambitious scenario is Negawatt with a factor 3.6, the

least ambitious is Markal. In the latter, the optimization process of the technological cost to a given demand can only be achieved for a price of carbon high enough to allow the use of 90GW of nuclear capacity.

7. For **transport**, the elements of discussion are the respective parts of:
 - Electricity in final demand of transport knowing that the consumption of fossil fuels in the transport sector appears to be at least divided by 2
 - Prospects for improving the energy efficiency of conventional vehicles
 - The modal shift and demand side management of mobility.

This debate is directly related to the models limitations to represent the evolution and potential bifurcations of demand. Another dimension is the role of biofuels: what type, what source, what competition for land use? Hydrogen through the various scenarios does not really appear as a solution for the whole problem.

8. In the **building** sector, strict and ambitious thermic regulations for new buildings and the achievement of an ambitious thermic renovation program are essential. However, the authors of the scenarios express contrasting views on the opportunity to exploit the full potential in this area because of the pace of renovation and difficulties in establishing controls and obligations in this area. This leads to a dispersion of the results for this sector and reflects the underlying measures: incentives vs. obligation of thermic renovation. Another discussion topic refers to the share of electricity in final consumption including the possibilities of development of heating with electricity supplied by nuclear power. The most intensive scenario in this option is the Markal scenario with 70% of final energy consumption for the building sector being electricity (for the record, today only 31%). These solutions relying on electricity conflict with solutions based on district heating, solar water heaters, micro-CHP. In the Negawatt scenario, the low share of electricity is noteworthy; besides the only non-renewable source of electricity in this sector is CHP or combined cycle gas, the remainder relying on decentralized energy sources.
9. In the industry, a lack of expertise appears in many scenarios, leading to high levels of uncertainty. Moreover, it is difficult to project industrial emissions without addressing the issue of international industry competitiveness and the imports carbon content, since a regulatory climate in the area in France or Europe can cause a loss competitiveness of the targeted industry. However, since these scenarios were developed, the EU climate energy package gives targets for reductions specifically for the industrial sector in 2020 in support of the Tradable Emissions Permit system. This limits the stakes of developing a thorough working model for these sectors.

10. Technological trajectories appear very contrasted with two types of trends standing out:

- On the one hand, a **majority of the scenarios are based on a massive expansion of nuclear energy powering the electric heating in buildings⁵, a fleet of electric vehicles (or hydrogen) and possibly a growing demand for**

⁵ This orientation does not seem realistic with the new thermic legislation RT2012.

specific electricity.

- On the other hand, the Negawatt scenario based on very important gains in energy efficiency both for demand and supply and energy demand side management, allowing renewable to take a prominent place in the final mix.

For all scenarios, even if the assumptions on cost trends and policies in support of renewables are uncertain, the production from renewable resources reaches in most cases at least 50Mtep in final energy (equivalent to today's oil consumption), which is significant.

11. The assumptions in terms of potential for achieving improved energy efficiency (including vehicles and buildings) are contrasted. Similarly, the potential in terms of evolution of mobility demand mobility and especially modal shift is very unclear, relying on assumptions handled with difficulty. Moreover, confusion is often made between energy efficiency and energy demand side management.

12. In the light of this analysis, we define the characteristics of the scenarios that we want to develop in the **EnciLowCarb** project:

- Similarly to other scenarios, we will only take into account the energy-related CO₂ emissions, emitted on French soil. Nevertheless, a discussion will be conducted each time about the impact of represented scenarios on i) the carbon content of the trade balance and ii) the evolution of non-CO₂ emissions and in particular the agricultural sector in the case of development of domestically produced or imported ethanol;
- Economic assessment of measures to reduce emissions and analysis of the feedback of climate policies on levels of demand using the **Imaclim-R** model: impact on energy prices, carbon prices required to meet a trajectory of emissions, impact on the purchasing power of households;
- Description of the material content of growth and development styles;
- Fine representation of the electricity sector taking into account the seasonality of use and potential changes in the load curve;
- Description of the international context (energy prices, biofuels development at the international level, European price of electricity ...)
- Building social acceptability using the **Imaclim-R** model as a tool for:
 - Representation of the plurality of visions as to technological change regarding assumptions on the demand side (energy efficiency equipment final energy demand side management) and supply side (nuclear, CCS, hydrogen, smart grid, renewables). In order to represent this diversity we have chosen to describe our technological assumptions for the scenarios according to two axes: first axis – level of power centralization (centralized vs. decentralized); second axis – energy demand side management. The ENCILowcarb project will focus particularly on developing a scenario with decentralized production and high demand side management.
 - Consultation with stakeholders around the scenario results in order to foster a dialog between modeler and stakeholder, assessing the social acceptability of measures.

Key figures:

1. Reduction between -55% and -77% in 2050 compared to 2000, outside the range established by the IPCC (between -80 and -95% in 2050)
2. Reduction of final energy consumption between -8.2% and -34.8% in 2050
3. Share of renewables in electricity between 4% and 85%
4. Share of nuclear electricity and between 0% and 82%
5. Production of electricity between 422 and 932 TWh
6. Share of electricity in final energy in the transport between 6% and 92%
7. Share of electricity in final energy in the residential / tertiary between 37% and 63%
8. Greater effort to reduce average for the transport sector
9. Reducing emissions by sector for the largest residential / housing with a factor reaches 8.3 in the scenario Enerdata
10. Larger dispersion in emission reductions for industry: variations between a factor 0.8 to 6 relative to 2000