



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'usagers 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>

Sommaire

LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	7
RESUME	9
ABSTRACT	13
INTRODUCTION	17
PARTIE I – LA MODELISATION DU FACTEUR 4 EN FRANCE AUJOURD’HUI – ETAT DE L’ART	19
1. DE NOMBREUX EXERCICES DE MODELISATION	19
1.1. LE SCENARIO NEGAWATT - 2006	20
1.2. LE SCENARIO NEGATEP - 2007	21
1.3. « LA DIVISION PAR 4 DES EMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE EN FRANCE D’ICI 2050 » MIES - 2004	21
1.4. POLITIQUE ENERGETIQUE NATIONALE ET LUTTE CONTRE L’EFFET DE SERRE - PAR HENRI PREVOT INGENIEUR GENERAL DES MINES - 2004	22
1.5. « ETUDE POUR UNE PROSPECTIVE ENERGETIQUE CONCERNANT LA FRANCE » - OBSERVATOIRE DE L’ENERGIE, DIRECTION GENERALE DE L’ENERGIE ET DES MATIERES PREMIERES – ENDERDATA, LEPII-EPE – 2005	23
1.6. « PERSPECTIVES ENERGETIQUES DE LA FRANCE A L’HORIZON 2020-2050 », CAS - CENTRE D’ANALYSE STRATEGIQUE, COMMISSION ENERGIE - JEAN SYROTA - 2007	24
1.7. “QUANTIFICATION DU SCENARIO GRENELLE A L’HORIZON 2020/2030”, ELIE BELLEV RAT / BERTRAND CHATEAU /ALBAN KITOUS, 2008	24
1.8. RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL « DIVISION PAR QUATRE DES EMISSIONS DE GES DE LA FRANCE A L’HORIZON 2050 » DE LA COMMISSION DE BOISSIEU, MEDD, MEFI – 2006	25
1.9. VIRAGE ENERGIE – 2008	25
2. LES APPROCHES DE MODELISATION	26
2.1. DANS LA JUNGLE DES MODELES	26
2.2. LES APPROCHES RETENUES DANS LES EXERCICES SELECTIONNES	28
3. COMPARAISON DES HYPOTHESES DE CADRAGE	34
3.1. CARACTERISTIQUES GENERALES	34
3.2. OBJECTIFS DE REDUCTION, ENERGIE FINALE ET ENERGIE PRIMAIRE	35
3.3. HYPOTHESES ECONOMIQUES	43
3.3. SCENARIO DE REFERENCE ET SCENARIO TENDANCIEL	46
3.4. CONCLUSION	52
4. ANALYSE SECTORIELLE	53
4.1. INTRODUCTION	53

4.2. TRANSPORT	54
4.3. BATIMENT (RESIDENTIEL, TERTIAIRE)	63
4.4. INDUSTRIE	73
4.5. BILAN SECTORIEL GLOBAL	78
4.6. ENERGIE	81
4.7. INTENSITE ENERGETIQUE ET INTENSITE CARBONE	93
PARTIE II - FEUILLE DE ROUTE POUR LA SCENARISATION ENCILOWCARB	95
1. PRESENTATION DU PROJET ENCI LOWCARB	95
2. QUELLE EVALUATION ECONOMIQUE DES SCENARIOS FACTEUR 4 ?	95
2.1. DES ANALYSES ECONOMIQUE FRUSTES	95
2.2. UN SYSTEME ENERGETIQUE PEUT-IL ETRE INDEPENDANT DU SYSTEME ECONOMIQUE ?	100
2.3. OUTIL DE MODELISATION POUR ENCILOWCARB : IMACLIM-R UN MODELE A LA RECHERCHE D'UNE COHERENCE FORTE ENTRE EVOLUTIONS TECHNIQUES ET CONTRAINTES ECONOMIQUES	101
3. QUEL ROLE POUR LA MODELISATION : LA CONSTRUCTION DE L'ACCEPTABILITE SOCIALE ?	101
3.1. L'ACCEPTABILITE SOCIALE DES SCENARIOS : UNE GRANDE ABSENTE DES EVALUATIONS	101
3.2. DES BOITES NOIRES DIFFICILEMENT APPROPRIABLES EN DEHORS DE LA COMMUNAUTE DE MODELISATEURS	102
3.3. LA SCENARISATION COMME OUTIL DE CONSTRUCTION DU CONSENSUS ET D'APPROPRIATION SOCIALE	104
3.4. DEFINITION DU CADRE METHODOLOGIQUE DE CONSTRUCTION DES SCENARIO ENCILOWCARB	105
4. ALLER AU-DELA DES VISIONS UNIQUEMENT TECHNOLOGIQUES : SOBRIETE, EFFICACITE ENERGETIQUE OU RUPTURE TECHNOLOGIQUE ?	106
4.1. DES ANALYSES DES POTENTIELS D'EFFICACITE ENERGETIQUE DIVERGENTS	106
4.2. VERS UNE NOMENCLATURE EFFICACITE ENERGETIQUE / SOBRIETE ENERGETIQUE	107
4.3. PROPOSITION METHODOLOGIQUE ENCILOWCARB	111
5. TRAJECTOIRES DE REDUCTIONS ENCILOWCARB : RESPECTER LE 2°C, FACTEUR 4 OU PLUS	111
6. NOMENCLATURE DES SCENARIOS	114
BIBLIOGRAPHIE	116

Liste des figures

Figure 1 et 2 : Energie finale (à gauche) et émissions de CO2 (à droite) – scénarios de réduction	36
Figure 3 : Développement prix international du pétrole et du gaz - Enerdata	45
Figure 4 : Emissions CO2 des scénarios tendanciels.....	47
Figure 5 : Consommation énergie finale des scénarios tendanciels.....	48
Figure 6 : Décomposition a la Kaya des réductions d'émissions dans le secteur des transports	61
Figure 7 : Part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale dans les transports en 2050 dans les différents scénarios (2030 pour Prévot)	62
Figure 8 : Développement type de bâtiments – Enerda.....	67
Figure 9 : Analyse secteur Résidentiel et tertiaire	71
Figure 10 : Part de l'électricité d'origine non renouvelable dans l'énergie finale consommée dans le secteur résidentiel/tertiaire	72
Figure 11 : Analyse secteur industrie	77
Figure 12 et Figure 13: Contribution sectorielle aux réductions d'émissions en MtCO2 (en haut) et pourcentage par rapport aux réductions totales (en bas).....	78
Figure 14 : Répartition détaillée des EnR par source - Négawatt.....	83
Figure 15 : Répartition selon modularité - Négawatt.....	83
Figure 16 : Electricité - Enerdata.....	86
Figure 17 : Mix énergétique en 2050 – comparaison (en TWh et en %)	90
Figure 18 et Figure 19: Répartition du mix énergétique dans l'énergie primaire en volume et en pourcentage	91
Figure 20 : Evolution de l'intensité énergétique et de l'intensité carbone entre 2000 et 2050.....	94
Figure 21 : Trajectoires d'émission 2000-2050.....	112
Figure 22 : Probabilité de ne pas dépasser une augmentation de température de 2°C	112
Figure 23 : Trajectoires mondiales d'émission de CO2 (GtC) énergétique pour des niveaux de probabilité de respecter le 2°C de 66 et 75%.....	113
Figure 24 : Trajectoires d'émission de CO2 (GtC) énergétique pour la France pour des niveaux de probabilité de respecter le 2°C de 66 et 75% selon une règle d'allocation de contraction et convergence en 2050.....	113
Figure 25 : Catégorisation des scénarios analysés	115

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Types de modélisation utilisée dans les scénarios analysés	33
Tableau 2 : Caractéristiques générales (horizon temporel, niveau d'émissions en 2050, consommation d'énergie finale, taux de croissance économique et prix du pétrole)	34
Tableau 3 : Récapitulatif des objectifs de réduction dans les différents exercices par rapport aux émissions de CO2 seul en 2000	35
Tableau 4 : Energie finale - NégaWatt	37
Tableau 5 : Energie primaire - NégaWatt	37
Tableau 6: Energie primaire et finale - Enerdata	40
Tableau 7 : Facteur de réduction - Enerdata	41
Tableau 8 : Sources d'énergie finale en 2030 (en Mtep) - Prévot	41
Tableau 9: Tableau récapitulatif - Syrota MedPro-POLES	42
Tableau 10: Emissions sectorielles MtC - Syrota MedPro-POLES	42
Tableau 11: Tableau récapitulatif - Syrota Markal	42
Tableau 12: Emissions sectorielles MtC - Syrota Markal	42
Tableau 13 : Comparaison des résultats des scénarios à 2020 et 2050 avec des critères de l'UE	43
Tableau 14 : Croissance démographique, croissance économique, croissance par habitant	44
Tableau 15 : Hypothèses de cadrage pour le scénario Syrota	45
Tableau 16 : Scénario tendanciel Enerdata	50
Tableau 17 : Comparaison des émissions de CO2 pour les scénarios Markal et MedPro-Poles	52
Tableau 18 : Comparaison des résultats des scénarios de référence et volontaristes à 2020 avec les objectifs globaux de l'UE	52
Tableau 19 : Bilan du secteur de transport en TWh - NégaWatt	54
Tableau 20 : Indicateurs d'évolution du secteur des transports dans le scénario négaWatt	54
Tableau 21 : Principales caractéristiques des scénarios - volet transports - Mtep	56
Tableau 22 : Secteur du transport - Scénario Prévot	57
Tableau 23 : Développement énergie finale - Enerdata	58
Tableau 24 : Secteur du transport - Enerdata	58
Tableau 25 : Hypothèses d'évolution du secteur transport dans les scénarios Med-Pro et Markal	59
Tableau 26: Estimation des gisements de réduction des émissions de CO2 dans les transports qui a servie de base à l'élaboration des hypothèses pour Markal et Med-Pro	59
Tableau 27 : Evolution dans les scénarios Med-Pro et Markal de la consommation d'énergie finale et des émissions des transports	59
Tableau 28 : Emissions en 2050 dans le secteur des transports dans les scénarios et facteur de réduction par rapport à 2000	61
Tableau 29 : Bilan du secteur Habitat et Tertiaire en TWh	63
Tableau 30 : Secteur résidentiel - scénario négaTep	64
Tableau 31: Secteur Résidentiel -Tertiaire - Agriculture - Enerdata	66
Tableau 32 : Facteur de réduction - Enerdata	66
Tableau 33 : Hypothèses secteur Résidentiel et Tertiaire - Enerdata	66
Tableau 34 : Emissions et énergie finale - Syrota	69
Tableau 35 : Hypothèses Résidentiel-tertiaire - Syrota	69
Tableau 36 : Estimation des gisements de réduction des émissions de CO2 dans le résidentiel-tertiaire	70
Tableau 37: Habitat - Facteur de réduction des émissions	71
Tableau 38 : Secteur industrie - Enerdata	74
Tableau 39 : Industrie et Agriculture - Syrota	75
Tableau 40 : Hypothèses industrie - Syrota	75
Tableau 41: Analyse secteur industrie - Facteur d'émission	77
Tableau 42 : Niveaux de réductions dans les différents secteurs pour tous les scénarios	79
Tableau 43 : La part des différentes sources d'énergie en TWh - NégaWatt	82
Tableau 44 : Bilan énergie primaire et évolution des sources d'énergie	83
Tableau 45: Secteur énergie - NégaTep	84
Tableau 46 : Consommation énergie primaire et finale - Enerdata	85
Tableau 47: Emissions et consommation énergétique - Syrota	87
Tableau 48 : Comparaison des mix d'énergie primaire (en Mtep) - Syrota	87

<i>Tableau 49: Hypothèses pour le secteur de l'énergie - Syrota</i>	87
<i>Tableau 50 : Comparaison de la production d'électricité - Syrota</i>	88
<i>Tableau 52 : prise en compte des rétroactions économiques des politiques climatiques dans les différents scénarios</i>	96
<i>Tableau 53: Coût marginal de la tonne CO2 évitée en scénario de référence contraint par une trajectoire facteur 4 – Markal (Syrota)</i>	99
<i>Tableau 54: Valeur du Carbone (€/tCO2)- Syrota</i>	99
<i>Tableau 51 : Sobriété et efficacité énergétique dans les scénarios analysés</i>	110
<i>Tableau 55: Trajectoires de réduction des émissions pour la France correspondant à des niveaux de probabilité de 66 et 75% pour les seules émissions de carbone énergétique</i>	114

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 **Imaclim-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 **Imaclim-R** :
 - Représentation de la pluralité des visions quant à l'évolution technologique concernant les hypothèses côté demande (efficacité énergétique des

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

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 ENCILowcarb 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

INTRODUCTION

Le seuil d'un réchauffement climatique global de 2°C est devenu la référence de l'action de l'Union Européenne depuis 1996, ou encore tout dernièrement de la Communauté internationale dans le cadre de « l'Accord de Copenhague ». Ce seuil est la traduction du « niveau permettant d'éviter des perturbations anthropiques dangereuses du changement climatique », objectif de la Convention de Rio (1992). Le respect de cette contrainte nécessiterait une division par au moins 4 des émissions de GES des pays industrialisés en 2050 par rapport à leurs émissions de 1990. Selon les dernières observations et l'avancée des connaissances scientifiques (GIEC 2007), pour maximiser les chances de rester effectivement en deçà d'un réchauffement de 2°C, les pays industrialisés devraient réduire leurs émissions entre 80-95%⁶. Des scénarios montrent que cet objectif est techniquement possible au niveau européen.⁷

En France, c'est le facteur 4 qui a été inscrit en 2005 dans la loi de programmation et d'orientation de la politique énergétique (loi POPE de juillet 2005⁸). Les lois Grenelle y font également référence. Comment y parvenir ? Il n'y a pas une trajectoire unique, comme le montrent l'ensemble des scénarios développés en France définissant à chaque des trajectoires compatibles avec le Facteur 4 :

- 1) « NégaWatt » – 2006
- 2) « Négatep » – 2006
- 3) « La division par 4 des émissions de CO₂ en France d'ici 2050 » MIES - 2004
- 4) « Politique énergétique nationale et lutte contre l'effet de serre » - Henri PREVOT - 2004
- 5) « Etude pour une prospective énergétique concernant la France » Observatoire de l'Energie, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières – ENDERDATA, LEPII – 2005
- 6) « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », Centre d'analyse stratégique, Commission énergie - Jean Syrota - 2007
- 7) « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 » Rapport du Groupe de travail, présidence de Christian de Boissieu - 2006
- 8) « Quantification du Scénario Grenelle » à l'horizon 2020/2030 - Elie Bellevrat - Bertrand Château – Alban Kitous / 26 Novembre 2008

Ces 8 exercices se placent au niveau national, mais d'autres exercices adoptent également une approche territoriale et représentent l'atteinte du facteur 4 au niveau du territoire : « Virage Energie », Association Virage énergie Nord pas de Calais – 2008.

Le problème est que ces scénarios, censés penser le monde dans lequel la société française va vivre, apparaissent comme des boîtes noires pour qui ne fait pas partie du cercle proche

⁶ Meinshausen, 2009 / WBGU, 2009

⁷ Blueprint Germany, WWF 2009 / « Europe's Share of the Climate Challenge - domestic Actions and International Obligations to protect the Planet » Stockholm Environment Institute, 2009

⁸ Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique

du modélisateur. Ceci pose un problème d'autant plus important qu'il n'existe encore que peu de scénarios réalisés indépendamment de l'Etat et réalisés à un niveau politique suffisant pour porter le débat public. Ainsi, au travers des 7 exercices présentés ici, 4 sont issus de commandes institutionnelles (la MIES, la DGEMP, la Commission Syrota sur commande du premier ministre) avec un fort argument d'autorité.

C'est pourquoi le projet EnciLowCarb, financé par la Commission Européenne, coordonné par le Réseau Action Climat vise au travers de partenariats nationaux entre centre de recherche (le Centre International de Recherche en Environnement et Développement – CIRED pour la France) et organisations de la société civile à élaborer de manière concertée avec les parties prenantes des scénarios pour la France, sobre en carbone, compatibles avec le seuil de 2°C de manière à évaluer à chaque fois l'acceptabilité sociale des mesures mises en œuvre. Le but est de construire conjointement avec les parties prenantes un scénario où chacun se reconnaîtrait et où chacun du coup s'approprierait ces grands objectifs.

Pour cela, nous menons dans la première partie de ce rapport une analyse critique des exercices de modélisation du Facteur 4 existant aujourd'hui ; analyse critique à la fois en termes de méthodologie de modélisation utilisée, en termes d'hypothèses économiques et technologiques, en termes de résultats et de message délivré. Cette analyse nous permettra de définir dans la seconde partie du rapport une « feuille de route » pour la construction des scénarios dans le cadre du projet EnciLowCarb.

PARTIE I – LA MODELISATION DU FACTEUR 4 EN FRANCE AUJOURD’HUI – ETAT DE L’ART

Dans cette première partie volumineuse du rapport, nous passons en revue les scénarios qui ont été développés au niveau français. L’objectif est de faire une synthèse et de mener une analyse critique à la fois :

- des méthodologies utilisées pour tracer la trajectoire vers l’objectif,
- des hypothèses technologiques et économiques
- des leviers mis en œuvre pour l’atteinte de l’objectif (technologiques, comportementaux, réglementaires...) au travers des différents secteurs,
- ainsi que de la prise en compte ou non dans les analyses de la dimension sociale.

Ceci nous permet de mettre en avant d’un côté les points positifs et les manques de ces exercices, de l’autre côté les points communs et points de divergence dans ces exercices de manière à définir dans la seconde partie une « feuille de route » pour la construction de scénarios répondant aux objectifs du projet EncilowCarb.

1. De nombreux exercices de modélisation

L’objectif de maintenir le réchauffement climatique en deçà de 2°C a largement été traduit par la nécessité de diviser par 4 les émissions françaises en 2050 par rapport à 1990.⁹ Ceci a donné naissance à un paysage varié de scénarios énergétiques pour la France:

- 1) « NégaWatt » – 2006
- 2) « Négatep » – 2006
- 3) « La division par 4 des émissions de CO₂ en France d’ici 2050 » MIES - 2004
- 4) « Politique énergétique nationale et lutte contre l’effet de serre » - Henri PREVOT - 2004
- 5) « Etude pour une prospective énergétique concernant la France » Observatoire de l’Energie, Direction Générale de l’Energie et des Matières Premières – ENDERDATA, LEPII – 2005
- 6) « Perspectives énergétiques de la France à l’horizon 2020-2050 », Centre d’analyse stratégique, Commission énergie - Jean Syrota - 2007
- 7) « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l’horizon 2050 » Rapport du Groupe de travail, présidence de Christian de Boissieu - 2006
- 8) « Quantification du Scénario Grenelle » à l’horizon 2020/2030 - Elie Bellevrat - Bertrand Château – Alban Kitous / 26 Novembre 2008
- 9) « Virage Energie », Association Virage énergie Nord pas de Calais - 2008

Du fait du manque de données accessibles (pour 7) et 8)) ou d’une échelle d’analyse

⁹ Les émissions par capita en France sont inférieures à celles de la majorité des pays industrialisés, ainsi qu’à la moyenne européenne. Un objectif de -95% pour l’Allemagne sera comparativement plus ambitieux pour la France car les réductions les plus simples et les moins coûteuses à atteindre auront été déjà accomplies. Au niveau des émissions par capita une réduction de 75% pour la France sera équivalente.

différente (du scénario Virage énergie pour le Nord-Pas de Calais) seuls 6 scénarios seront analysés de manière extensive dans le rapport (en sachant que le scénario MIES inclut 5 visions énergétiques différentes correspondant à un facteur 4):

- le scénario négaWatt – 2006
- le scénario négaTep – 2007
- le scénario ENERDATA – 2005
- le scénario Prévot – 2007
- les scénarios MIES – 2004
- les scénarios Syrota – 2007.

1.1. Le scénario NégaWatt - 2006

L'association négaWatt (nW), créée en 2002, rassemble 350 professionnels de l'énergie. L'objet de l'association est de promouvoir un changement de regard sur l'énergie que nous consommons : mieux consommer au lieu de consommer plus. De cette approche est née l'idée du « négaWatt », qui représente l'énergie non consommée grâce à un usage plus sobre et plus efficace de l'énergie. L'association nW part du constat que le potentiel de "production" de négaWatts, avec des solutions aujourd'hui disponibles et fiables et de multiples avantages induits (absence de pollution et de nuisances, décentralisation, création d'emplois de qualité, responsabilité, solidarité, paix...) est supérieur à la moitié de la consommation mondiale actuelle d'énergie.

La démarche négaWatt se décline selon le triptyque suivant :

- La **sobriété énergétique** qui consiste à supprimer les gaspillages et les besoins superflus : baisser la température de chauffage, toujours éteindre les veilles et profiter au mieux de la lumière naturelle avant d'allumer la lumière.
- L'**efficacité énergétique** qui permet de réduire les consommations d'énergie pour un besoin donné.
- Les **énergies renouvelables** (ENR) qui répondent à nos besoins énergétiques avec un faible impact sur notre environnement et grâce à une gestion décentralisée.

L'association a développé sur cette base le scénario négaWatt comme une alternative aux scénarios de croissance continue de la consommation. Elle a également apporté son expertise lors de nombreux travaux touchant l'avenir énergétique (Grenelle de l'Environnement, groupe de travail sur la pointe électrique, Comité Opérationnel du Grenelle sur la réglementation thermique RT2012).

Après la publication d'un premier scénario en 2003, un nouveau scénario a été publié en 2006. Il vise une réduction des émissions de GES dues à la production et la consommation d'énergie par un facteur 4,2 en 2050 par rapport à l'année 2000 et par un facteur 6,6 par rapport à un scénario tendanciel. Il est basé sur des technologies éprouvées et sans risques et prévoit la sortie du nucléaire en 2035. Cette sortie ne sera rendue possible que si la consommation électrique se stabilise entre 2000 et 2050, parallèlement au doublement de

ses usages.

Par rapport au scénario tendanciel défini comme la continuation des tendances passées, les négaWatts représentés par la sobriété et l'efficacité énergétique par un renouvellement des équipements actuels énergivores et la rénovation de bâtiments existants permettent d'économiser 64% de la consommation tendancielle d'énergie. Du fait de cette réduction importante de besoins énergétiques, les ENR représentent 71% de la production d'énergie primaire en 2050. Par ailleurs le rendement du système énergétique¹⁰ augmente à 83% en 2050. Seuls 62% de l'énergie primaire consommée aujourd'hui sera nécessaire pour satisfaire nos besoins en 2050.

1.2. Le scénario NégaTEP - 2007

Le scénario NégaTEP (nT) a été publié en 2007 par des membres de l'association « Sauvons le climat ». Le manifeste bénéficie du soutien de l'ARCEA (Associations des retraités du CEA), de l'AEPN (Association des Ecologistes Pour le Nucléaire), du GR21, du MLNE (Mouvement National de Lutte pour l'Environnement) et de la SFP (Société Française de Physique).

Le scénario définit quatre grands axes pour atteindre l'objectif de division par 4 des émissions énergétiques GES en 2050 par rapport à l'année 2000:

- **Économiser l'énergie** – en réduisant chaque année la consommation d'énergie de 1% ;
- **Décarboner** l'énergie utilisée, en réduisant la part des énergies fossiles à 33Mtep soit 62% de moins par rapport à 2000 ;
- Développer les **ENR** qui couvriront, en 2050, 37% des besoins ;
- **Maintenir le nucléaire.**

Dans ce scénario, le nucléaire représente 78% de la production d'électricité en 2050, soit une augmentation de 60% de la production par rapport à 2000. Les besoins de pétrole pour les transports diminuent de 50 à 15Mtep. L'augmentation de la mobilité est possible grâce à une substitution importante des énergies fossiles par l'électricité et les agroc carburants de deuxième génération.

1.3. « La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 » MIES - 2004

Ces scénarios ont été développés par Pierre Radanne, ancien président de l'ADEME, en 2004 à la demande de la MIES (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre). Il s'agit juste de photos (sans les trajectoires) du paysage énergétique en 2050 compatibles avec le Facteur 4.

19 variantes ont été testées (dont 8 sont décrites dans le rapport) qui visent un facteur 3,3 des émissions énergétiques de CO₂ à l'horizon 2050 par rapport à l'année 2000 avec des choix technologiques différents. Seuls 5 atteignent cette valeur :

- Scénario F4 nucléaire – développement accru du nucléaire avec pénétration de l'électricité dans tous les usages y compris le transport ;
- Scénario RCogN –qui équilibre le recours au nucléaire par le développement de la

¹⁰ Le rendement énergétique du système énergétique est défini comme le ratio énergie finale / énergie primaire.

cogénération et des renouvelables ;

- Scénario F4 Séquest – développement de la séquestration de CO₂ ;
- Scénario F4 sN+S – sortie du nucléaire avec recours à la séquestration du CO₂ ;
- Scénario F4 H2 – développement d’une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires

A noter que le seul scénario Facteur 4 sans nucléaire nécessite la séquestration du CO₂.

Des variantes de scénarios tendanciels sont également étudiées :

- La variante « sans Eco » représente un scénario tendanciel,
- La variante « Eco » inclut une amélioration de l’efficacité énergétique sans atteindre le facteur 4,
- La variante « Offre » substitue une partie de l’offre vers du nucléaire sans augmentation de l’efficacité énergétique.

1.4. Politique énergétique nationale et lutte contre l’effet de serre - par Henri PREVOT ingénieur général des mines - 2004

Henri Prévot est Ingénieur général des Mines et membre du Conseil Général des Mines. Il a développé un scénario de politique énergétique nationale et lutte contre l’effet de serre publié dans la Revue de l’Energie (n°554) en 2004, et actualisé en 2007. 3 variantes sont présentées dans son livre, « Trop de pétrole », Seuil, 2007¹¹.

Le scénario tendanciel utilisé est le scénario DGEMP 2004 « Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France »¹². En 2030, les émissions de CO₂ sont divisées par 2,8 par rapport à l’année 2000 sans qu’aucun changement de comportement des consommateurs ne soit considéré. La consommation d’énergie finale est stabilisée en 2030 par rapport à l’année 2000 et l’intensité énergétique diminue de 1% par an. La part de l’électricité dans l’énergie finale augmente de 80% par rapport à 2000 alimentant les transports et surtout le chauffage dans le résidentiel et le tertiaire. Les orientations technologiques de ce scénario sont basées sur des technologies éprouvées sans aucun recours à l’hydrogène ou à la capture et séquestration du carbone.

La réduction des émissions de CO₂ est obtenue par :

- le contrôle de la consommation d’énergie (travaux d’isolation etc.),
- un recours massif à la biomasse,
- l’augmentation importante de la consommation d’électricité nucléaire.

Le développement des énergies renouvelables ne tient pas compte des potentiels du solaire photovoltaïque, de l’éolien, de la géothermie profonde. Le scénario repose par contre sur

¹¹Henri Prévot met à disposition sur son site : <http://www.2100.org/PrevotEnergie/> un tableur avec lequel chacun peut calculer les émissions selon ses propres hypothèses. Les données les plus importantes sont 1) la consommation totale par secteur : industrie, transport (en équivalent carburant liquide), résidentiel et tertiaire, 2) la quantité d’énergie électrique utilisée pour le transport hors rail, 3) la quantité de biomasse disponible, 4) la technique utilisée pour produire du biocarburant - voir la fiche biocarburant, 5) la quantité de biomasse et d’électricité utilisée dans le chauffage, 6) la quantité de biomasse utilisée pour faire de l’électricité, 7) la capacité de production éolienne.

¹² DGEMP-OE (2004) : Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France ;

des solutions bi-énergie¹³ pour le chauffage et le transport.

1.5. « Etude pour une prospective énergétique concernant la France » - Observatoire de l'Energie, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières - ENDERDATA, LEPII-EPE - 2005

Le scénario Enerdata et LEPII-EPE a été commandé par la DGEMP (Direction générale de l'Energie et des Matières Premières) en 2005.

Les réductions obtenues sont un facteur 3,1 pour la France métropolitaine à l'horizon 2050. Ce scénario présente toutefois une caractéristique très forte : les émissions continuent à croître pendant 20 ans avant de décroître forcément d'autant plus fortement pour atteindre ce facteur 3,1. Le scénario tendanciel est une actualisation de celui établi par la DGEMP de 1999-2000. Les travaux de modélisation s'appuient sur les modèles MEDEE (modèle technico-économique d'exploration de la demande énergétique), POLES (modèle d'équilibre partiel - équilibre offre - demande - de simulation du système énergétique) et VLEEM (modèle énergie - environnement à très long terme).

La croissance de la demande d'énergie ralentit jusqu'aux alentours de 2030 et s'inverse ensuite, ceci malgré une poursuite de la croissance économique de plus de 2,3% par an. Le niveau de demande finale en 2050 pourrait ainsi revenir au niveau de 2020 grâce à la généralisation de certaines technologies très peu consommatrices d'énergie, notamment dans les bâtiments et les transports. Cette évolution s'accompagnerait d'une diminution de l'intensité énergétique finale, voisine de 2% par an sur les 50 prochaines années. Les énergies renouvelables contribuent, en utilisation directe, à hauteur de 15% de l'énergie finale consommée en 2050, l'essentiel relevant de la biomasse sous différentes formes, malgré un rôle mineur dévolu aux biocarburants.

La structure et les hypothèses du modèle POLES conduisent le système énergétique à un recours massif à l'électricité pour les consommations d'énergie finale et au nucléaire pour l'énergie primaire, et ce d'autant plus vite et plus fort que la contrainte carbone est importante et qu'elle se traduit dans le modèle par des prix du carbone élevés. Les auteurs précisent néanmoins qu'une autre représentation de l'organisation du système énergétique pourra aboutir à un équilibre offre-demande profondément différent.

Le scénario intègre un prix du carbone, traduction de l'objectif de réduction au niveau mondial (valeur duale de la contrainte). Ce prix du carbone fait évoluer les choix technologiques. Le scénario mondial de réduction des émissions de GES présente donc une véritable bifurcation, conduisant le système énergétique mondial d'une trajectoire de référence dominée par la problématique du pic pétrolier et un renchérissement du prix du pétrole à une trajectoire où les énergies fossiles sont largement exclues du bilan. Les prix des énergies fossiles s'établissent donc à un niveau comparativement faible, légèrement en dessous des prix de 2009.

¹³ Un système bi-énergie ou hybride est capable d'utiliser 2 sources d'énergie différente (pour un chauffage par exemple électricité et gaz).

1.6. « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », CAS - Centre d'Analyse Stratégique, Commission énergie - Jean Syrota - 2007

Le Premier ministre Dominique de Villepin a demandé le 12 mai 2006 au Centre d'analyse stratégique de réunir une commission de haut niveau en vue de « dégager les principales orientations opérationnelles et préconisations de politique publique en matière de maîtrise de la demande énergétique, de transports et d'aménagement, d'offre d'énergies et de régulation du marché énergétique ».

Compte-tenu de l'étendue et de la complexité des sujets à traiter, les travaux de la commission présidée par Jean Syrota se sont déroulés jusqu'à l'automne 2007. Le travail de la commission s'est organisé autour de six groupes thématiques, dont le groupe 5 – Scénarios énergétiques (Thierry Chambolle).

Ce groupe s'est appuyé sur deux expertises extérieures en matière de modélisation : l'une à orientation macro-économique (équilibre offre/demande avec le modèle Med-Pro), l'autre à caractère technico-économique (optimisation avec le modèle Markal).

Un résultat très marquant de ces travaux est qu'avec les hypothèses en termes d'efficacité énergétique choisies pour cet exercice les deux scénarios de réduction MARKAL et MedPro-POLES plafonnent respectivement aux facteurs 2,1 et 2,4 en 2050 si l'on exclut la possibilité de mise en œuvre de la séquestration du carbone en France. Avec utilisation du CCS un facteur 4 peut être atteint.

1.7. “Quantification du Scénario Grenelle à l'horizon 2020/2030”, Elie Bellevrat / Bertrand Château /Alban Kitous, 2008

L'objectif dans ce scénario est le chiffrage des conséquences du projet de Loi « Grenelle » sur l'énergie et les émissions de CO₂, dans le cadre des hypothèses de croissance tendancielle de la DGEMP.¹⁴ Dans ce cadre, deux modèles ont été utilisés :

- Med-Pro: projections détaillées *bottom-up* de la demande énergétique à partir des hypothèses socio-économiques de la DGEMP et des hypothèses techniques issues du processus du Grenelle.
- POLES: projections globales de l'équilibre offre-demande à partir des projections de Med-Pro, prenant en compte le marché du carbone. Les hypothèses techniques du processus Grenelle ont été reprises et complétées par le Comité de Pilotage de l'étude DGEMP.

A l'horizon 2020 un « scénario Grenelle nominal » est opposé à un « scénario différé ». Les hypothèses spécifiques au « scénario Grenelle nominal » sont celles résultant de

¹⁴ Les scénarios de la DGEMP 2004 et 2008 sont des scénarios français tendanciels à horizon 2030, avec une prise en compte des politiques réellement mises en place au moment de l'écriture du scénario. Les hypothèses sont les suivantes (scénario écrit en 2008) : 2,1% de croissance économique par an, croissance modérée de la population (+0,4%), pas de séquestration carbone, pétrole brut Brent à 70\$/bl (contre 30\$/bl dans le scénario écrit en 2004)...

l'implémentation stricte des articles de loi ; les hypothèses du « scénario différé » sont déduites de celles retenues dans le « scénario nominal », en tenant compte des délais d'adaptation technique et industrielle plus importants. La majorité de l'effort est fait dans le secteur résidentiel et tertiaire, les consommations d'énergie finale du secteur industriel et du transport augmentant par rapport à 1990. Le secteur des transports atteint un pic de consommation en 2010. Le scénario prend en compte des potentiels d'efficacité énergétique mais aussi de sobriété (transferts modaux).

Ce scénario ne sera étudié plus avant dans la suite de ce rapport du fait de l'accès impossible à des données détaillées sur les résultats des scénarios.

1.8. Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de GES de la France à l'horizon 2050 » de la Commission de Boissieu, MEDD, MEFI – 2006

Le groupe de travail « Division par quatre des émissions de GES de la France à l'horizon 2050 » présidé par Christian de Boissieu, économiste, président du Conseil d'Analyse Economique a été mandaté par le gouvernement dans le cadre d'une réflexion sur l'atteinte du Facteur 4 en 2050 par la France. Aucun scénario n'est chiffré, mais le rapport, sur la base d'une revue de littérature des scénarios existant pour la France ou dans d'autres pays, élabore des recommandations: définition du contour du mix énergétique français, changements de comportement dans le domaine du bâtiment et du transport, utilisation de la biomasse, promotion de la R&D et de ses applications, poursuite des mécanismes de droits d'émission échangeables...

Des visions assez différentes se sont exprimées au sein du Groupe « Facteur 4 » sur des aspects controversés, notamment la place du nucléaire en tant que solution compatible avec un développement durable. Aucun consensus n'a pu être atteint au sein du groupe sur la place future du nucléaire et du CSC.

Généralement il s'agissait avant tout de rassembler un maximum d'acteurs autour d'une table pour rendre visibles les points de divergence et de convergence.

1.9. Virage Energie – 2008

Cette étude réalisée par l'association Virage-Energie du Nord Pas de Calais a pour objet d'identifier les moyens à mettre en œuvre en région Nord-Pas de Calais pour diviser par 4 les émissions régionales de CO₂ et sans avoir besoin de renouveler les réacteurs nucléaires de Gravelines. L'objectif de l'association Virage-énergie est de montrer qu'un autre choix énergétique est possible.

L'association Virage énergie a repris les hypothèses générales du scénario ENDERDATA, LEPII – 2005 qui ont été régionalisées. Etant donnée la composition particulière des émissions dans la région Nord-Pas de Calais, l'accent a été mis sur les potentiels de réduction dans l'industrie sidérurgique et sur les variables du secteur des transports. Les coûts économiques n'ont pas été calculés ; par contre le nombre d'emplois directs créés dans la région par les mesures de restructuration des filières l'a été.

Comme ce scénario n'est pas un scénario national, il ne sera pas analysé dans ce rapport.

2. Les approches de modélisation

Cette section vise tout d'abord à présenter les méthodes de modélisation existantes dans le champ de la prospective énergétique et des politiques climatiques, et ensuite à confronter les exercices de modélisation français sur le Facteur 4 à cette nomenclature de méthodologies.

2.1. Dans la jungle des modèles

L'évolution économique mondiale est fortement liée à l'évolution du système énergétique. En outre, l'impact du système énergétique sur les émissions de GES est majeur. De nombreux modèles ont été créés pour étudier l'évolution conjointe de l'économie et des systèmes énergétiques.

Ces modèles présentent ainsi des caractéristiques spécifiques. En premier lieu, il convient de s'intéresser à l'échelle temporelle (court ou long terme : horizon 2015 ou 2100 par exemple) ainsi que l'échelle spatiale (couverture régionale, nationale ou mondiale) qui peuvent varier de modèle à modèle. Certains détaillent avec un soin particulier la partie économique ou bien la partie explicitant les alternatives technologiques.

Cette partie présente les deux grandes familles de modèles : les modèles technico-économiques (*Bottom-Up*) et les modèles macroéconomiques (*Top-Down*) pour aboutir à une nouvelle famille émergente à la jonction des deux : les modèles hybrides.

2.1.1. Les modèles technico-économiques

Les modèles technico-économiques (ou modèles *Bottom-Up*) ont pour vocation de représenter l'évolution de tout ou partie du système énergétique. Cette évolution du système énergétique est ainsi fondée sur les choix d'investissements et les comportements des agents économiques. Ces décisions aboutissent à un équilibre des marchés énergétiques.

La spécificité de ces modèles est de donner une description physique des technologies, des flux d'énergie et des équipements. Le reste de l'économie est généralement exogène (par exemple, le PIB est un paramètre exogène).

On distingue pour ces modèles deux types d'exercices fondamentalement différents dans leur approche.

Modèles d'optimisation

Les modèles d'optimisation du système énergétique, étant donné un certain nombre d'hypothèses minimisent le coût complet pour fournir un service énergétique final donné grâce à une description détaillée des technologies. Parfois, leur objectif est la maximisation du bien-être final de la population.

Exemples : MARKAL, MESSAGE.

Modèles de simulation

Dans une approche plus heuristique, on trouve les modèles de simulation de tout ou partie du système énergétique. Ils considèrent un système énergétique à l'année de référence, un certain nombre de règles et des contraintes guidant l'évolution de ce système et fournissent une évolution temporelle possible du système. De tels modèles participent souvent d'exercices prospectifs exploratoires.

Exemples : MEDEE (Enerdata), POLES pour la France, PRIMES, WEM et TIMER à l'échelle mondiale.

2.1.2. Les modèles macroéconomiques

Ce type de modèles (aussi appelé *Top-Down*) se concentre sur la représentation de l'ensemble des interactions au sein de l'économie avec une représentation très agrégée du système énergétique. On distingue trois catégories.

Modèles d'équilibre général

Les modèles d'équilibre général permettent la représentation des interactions sectorielles de l'économie. Il est ainsi possible de déterminer l'ampleur de la propagation des effets des politiques de réduction des émissions dans toute l'économie. Cela permet l'évaluation du coût macroéconomique des politiques de réduction des émissions.

Exemples : pour la France : GEMINI-E3, LINKAGE-ENV et IMACLIM-S. Pour le monde : EPPA, WORLDSCAN, SGM, WIAGEM ou AMIGA.

Modèles intégrés de contrôle optimal

Ces modèles calculent des trajectoires optimales de réduction des émissions, fondées sur une représentation très agrégée de l'économie et du cycle du carbone (voire du climat). Les systèmes technologiques (notamment énergétiques) sont en général représentés par des MACCs (*Marginal Abatement Cost Curve* ou courbe d'abattement marginal des coûts). Les MACCs sont des courbes représentant le coût d'émettre une tonne de carbone de moins lorsque l'on a déjà cessé d'émettre une certaine quantité de carbone.

Ils peuvent suivre une logique coûts/avantages (arbitrage inter-temporel entre coût de réduction et coût du changement climatique non évité) ou une logique coût/bénéfices (optimisation d'un profil temporel de l'action pour respecter un plafond d'émissions).

Exemples : DICE (& RICE) de Nordhaus, MIND, ENTICE, RESPONSE.

Modèles macroéconométriques

Ces modèles, avec un horizon temporel de court terme (5 à 20 ans), montrent l'ajustement à

court terme par les quantités qui prolongent les comportements passés. Le retard dans ces ajustements entraînera des déséquilibres temporaires (sous-optimalités des capacités de production, chômage conjoncturel).

Exemples : HERMES, E3MG, NEMESIS.

2.1.3. Les modèles hybrides

Enfin, à la frontière entre modèles technico-économiques et modèles macroéconomiques se trouvent les modèles hybrides. En effet, ceux-ci sont construits sur un couplage d'un modèle technico-économique avec un modèle macro-économique. Leur objectif est de garantir une meilleure cohérence des scénarios prospectifs.

Ils adoptent donc une structure de type E³ (*energy, economy, environment*). Ils comprennent ainsi une représentation du système énergétique, des équilibres économiques et des contraintes environnementales. Ceci permet de garder une meilleure cohérence des scénarios prospectifs : les évolutions économiques reposent sur un monde physique, des technologies plausibles et vice-versa, les trajectoires de pénétration technologique sont compatibles avec les capacités d'investissement et le jeu des prix relatifs des énergies, des technologies, des autres biens.

Grâce à cette architecture qui prend en compte « énergie, économie et environnement », les modèles hybrides permettent de capter les interactions entre les systèmes énergétiques et les mécanismes macroéconomiques. Ces phénomènes sont très importants dans l'évaluation d'une politique climatique, notamment pour l'acceptabilité sociale et l'insertion d'une telle politique dans les investissements économiques. Ces modèles rendent notamment possible la mise en évidence d'effets d'éviction de la facture énergétique des ménages sur la demande d'autres biens de consommation, d'effets rebonds autant en intensité énergétique qu'en niveau d'activité ou bien d'effets d'éviction entre investissements d'efficacité énergétique, et autres investissements.

Exemples : MERGE, MARKAL-MACRO avec une logique d'optimisation ; SGM, IMACLIM-R avec logique de simulation avec équilibre général.

2.2. Les approches retenues dans les exercices sélectionnés

Les outils méthodologiques sur lesquels s'appuient les scénarios étudiés ici se distinguent nettement par rapport à cette typologie de modèles et relèvent soit d'une simple analyse de données, soit effectivement d'utilisation de modèles, plutôt des modèles d'ingénieur *bottom-up*.

2.2.1. Projection, analyse de données/ équilibre emplois-ressources

NégaWatt

Le scénario négaWatt est fondé sur les principes suivants :

- Evaluation des tendances principales en termes de *besoins fondamentaux* de chaleur, de mobilité et besoins spécifique d'électricité ;
- Sur la base de technologies éprouvées et de technologies qui seront très vraisemblablement disponibles demain sans rupture technologique, calcul des consommations énergétique nécessaire pour répondre aux demandes en usages énergétique.
- Description des mesures et moyens permettant de tracer une trajectoire reliant entre la situation actuelle et les orientations souhaitées.
- Trajectoires correspondantes 2000-2050.

NégaTep

L'approche méthodologique est comparable à celle du scénario négaWatt : les besoins en énergie finale et primaire selon les différents secteurs sont spécifiés pour un scénario tendanciel et un scénario de réduction.

MIES

Aucune indication n'est fournie sur la manière dont les projections ont été faites. La démarche se fonde sur l'évaluation de la demande d'énergie utile en 2050 dans les différents secteurs selon une analyse des tendances passées. Ensuite, selon les variantes technologiques et les potentiels d'efficacité énergétique (les potentiels retenus sont uniquement incrémentaux c'est-à-dire éloignés de moins de 20% en 2050 de l'efficacité actuelle), les consommations finales et le bouquet énergétique relatif à chacune des variantes sont calculés.

Une analyse économique partielle portant des indicateurs économiques cohérents avec une telle évolution des systèmes techniques et des demandes est menée. Plusieurs « types » de valeur du carbone sont calculés. Une première reflète la valeur jusqu'à laquelle il existe un avantage économique à investir dans la maîtrise de l'énergie. Cette valeur du carbone correspond à une stabilité de la dépense énergétique en 2050 entre la variante sans maîtrise de l'énergie et celle de facteur 4 ici étudiée est de 184 €/tCO₂. Ce calcul est fondé sur une équivalence de la dépense énergétique en 2050 en référence à la dépense énergétique de la variante sans maîtrise de l'énergie. Le même raisonnement peut être effectué par rapport à la situation 2000, en supposant un poids constant de la dépense énergétique dans le PIB sur 50 ans. On aboutit alors à une valeur de 277 €/tCO₂. Ces calculs considèrent une stabilité du prix de l'énergie (avec un pétrole à 28€/bl). Dans la perspective d'une hausse du prix de l'énergie, la facture énergétique des variantes F4 augmentera, mais cette hausse ne compensera jamais les économies réalisées du fait des économies d'énergie. La rente qui se dégage donc toujours dans ces variantes Facteur 4 (estimée au moins à 46 milliards d'euros)

devrait être selon P. Radanne utilisée pour financer la lutte contre le changement climatique.

H. Prévot

H. Prévot part du postulat qu'une stabilisation de la consommation finale en valeur absolue est compatible avec la croissance économique et démographique et avec un équilibre ressources/emplois aptes à répondre à une division par 3 des émissions de GES. Selon lui, cette stabilisation se décline entre une nécessaire stabilisation des consommations d'énergie dans l'industrie qui ne doit pas être pénalisée par les politiques climatiques, une légère diminution dans l'habitat/résidentiel des consommations de chauffage, une augmentation des consommations spécifiques d'électricité et une croissance moindre que par le passé de la mobilité compensée par de forts gains en efficacité énergétique.

Pour répondre à ces demandes, H. Prévot évalue les potentiels de déploiement des technologies non carbonées selon des croyances subjectives (non à l'éolien, forte augmentation de la production nucléaire ou de la CCS, pas de filière hydrogène, beaucoup d'agrocarburants).

Une réflexion est menée pour évaluer le prix de l'énergie permettant à ces technologies de pénétrer et aux consommations de se stabiliser (hors industrie et transports de marchandises)

2.2.2. Utilisation de modèles

Enerdata

Le scénario s'appuie sur :

- Le modèle technico-économique d'exploration de la demande d'énergie MEDEE (version Med-Pro)
- Le modèle énergétique global en équilibre partiel POLES (équilibres offre-demande national, régional-Europe, mondial)
- Le modèle énergie-environnement à très long terme VLEEM (Very Long term Energy-Environment Model).

Le modèle MEDEE projette la demande énergétique par usage pour la France selon une approche économique procédant des déterminants des consommations^{15,16}. Ces projections

¹⁵ Les auteurs reconnaissent la fragilité de l'évaluation de l'impact des variations de prix de l'énergie sur le niveau et la structure de la consommation finale d'énergie.

¹⁶ La cohérence formelle des projections de demande énergétique s'apprécie à la fois ex ante de manière qualitative sur la base de jugements d'experts, et ex post à l'appui d'outils d'analyse quantitative formalisée (structures de consommation, intensité énergétique, coefficients budgétaires). Le niveau global de cohérence est apprécié par rapport aux évolutions historiques et par rapport aux niveaux et évolutions constatés dans d'autres pays similaires (en termes économiques et sociaux)

sont utilisées pour calibrer de manière fine les fonctions de demande du modèle d'équilibre sectoriel POLES pour la France. Aucune rétroaction de la projection de l'évolution de la demande sur l'économie n'est prise en compte, comme cela serait le cas avec un modèle d'équilibre général. Ce type de rétroaction est en effet considéré comme étant du second ordre.

Le modèle POLES est un modèle de simulation récursif du système énergétique mondial à l'horizon 2050 : la dynamique est donnée par les ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part et de prix de l'autre. Les évolutions économiques et démographiques sont exogènes, les évolutions de l'ensemble des variables caractérisant la consommation, la transformation, la production et les prix de l'énergie sont endogènes au modèle. La prise en compte des objectifs de réduction des émissions de GES est réalisée par l'introduction d'un prix du carbone, valeur duale de la contrainte carbone au niveau mondial qui est intégré dans les coûts de fonctionnement des technologies.

Le recours au modèle VLEEM se justifie par l'horizon temporel 2050, car il permet d'appréhender l'évolution des besoins énergétiques et des systèmes d'offre au-delà des horizons de pertinence des modèles exploratoires tels que MEDEE et POLES. Son degré de désagrégation sectorielle est moindre que celui des modèles précédents. Les images en 2050 de VLEEM sont utilisées pour cadrer les évolutions simulées par MEDEE et POLES au-delà de 2030.

La méthodologie utilisée s'organise en 5 étapes :

- Une vision énergétique cohérente avec un scénario F4 « souhaitable » a été élaborée tenant compte d'hypothèses majeures, d'une flexibilité possible et admise dans les structures sociales et économiques, notamment pour les Industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE) et les transports, de filières technologiques et ruptures technologiques « éligibles », etc. Un contexte de « politiques et mesures » et « d'instruments économiques » est défini pour contribuer à la réalisation de ce scénario souhaitable.
- Calcul des demandes finales : des projections centrales de VLEEM permettent de cadrer l'extrapolation à 2050 des projections de MEDEE (introduction de ruptures technologiques possibles au niveau de la demande et nouvelles structures économiques relatives au transport et aux IGCE). Elles sont ainsi traduites en demandes de POLES sur la période 2030-2050.
- Les modèles MEDEE et POLES sont utilisés séparément aux horizons 2010, 2020, 2030 et 2050.
- POLES est calibré à partir des résultats de MEDEE. Sont introduites dans POLES des technologies basses émissions qui s'avèrent nécessaires pour rendre le facteur 4 possible.
- Réalisation du scénario Facteur 4.

POLES représente l'ensemble du système énergétique et égalise les coûts marginaux de réduction des émissions par le biais d'un prix du carbone qui s'applique à la consommation finale et aux transformations d'énergie. Les réductions d'émissions proviennent donc de l'arbitrage du modèle dans un contexte d'égalisation des coûts marginaux entre réduction des consommations, diffusion des technologies basses émissions et changement dans le «

bouquet technologique ». A priori les bilans globaux calculés en fonction de la contrainte sur le carbone n'ont aucune raison de recouper strictement les projections de demande finale établies par MedPro dans l'optique *Bottom-Up*, indépendante des coûts.

L'analyse des différences est riche en enseignements :

- sur les conditions de dissémination des technologies alternatives et les processus de basculement qu'elles peuvent engendrer,
- sur l'interaction entre la valeur du carbone, le prix des énergies, les technologies alternatives et les comportements.

Syrota

Les deux scénarios du rapport Syrota se fondent sur deux modèles :

- Med-Pro qui est un bouclage de même nature que celui de Médée et de Poles dans l'exercice Enerdata ci-dessus
- le modèle Markal.

Le modèle Markal optimise sur l'horizon temporel un coût actualisé d'une représentation technico-économique fine du système énergétique français (demande et offre) : il inclut les substitutions de technologies en fonction de leur compétitivité relative et tient compte de différentes contraintes, comme le potentiel maximal d'une ressource ou le rythme de pénétration d'une technologie, et bien sûr la réduction des émissions de CO₂. Le modèle n'utilise pas dans cette version de fonctions d'élasticités de la demande au prix, l'évolution de cette dernière résultant du seul effet des hypothèses technico-économiques retenues.

Conclusion

Finalement, seuls trois scénarios reposent sur des modèles : Enerdata avec le modèle MEDEE + POLES et les deux scénarios du rapport Syrota avec toujours MEDEE+POLES et Markal-Times qui est le seul modèle faisant de l'optimisation sur le seul secteur énergétique.

Aucun de ces scénarios ne s'appuie sur des modèles d'équilibre général permettant de prendre en compte les rétroactions de l'évolution du secteur énergétique sur l'économie.

Tableau 1 : Types de modélisation utilisée dans les scénarios analysés

	négaWatt 2006	négaTep 2007	Enerdata 2005	Prévot 2007	Mies 2004	Syrota 2007	
Type de modélisation	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up+ Top-down	Bottom-up	Bottom-up	Bottom-up+ Top-down	Bottom-up
Type d'exercice	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Optimisation
Objectif	F4	F4	F4	F2 / F3	F4	F2 Mondial - F4 France	
Modèle	Analyse de données	Analyse de données	MEDEE +POLES VLEEM - projection de la demande en 2050	Analyse de données	Analyse de données	MEDEE+POLES	MARKAL- TIMES
Instrument de politique climatique	Hypothèses exogènes sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, sur la pénétration de la sobriété, des technologies...	Hypothèses exogènes sur la pénétration de technologies	Prix du carbone	Discussion sur le prix de l'énergie et sur un prix du carbone sous-jacent au mix énergétique décrit	Analyse de valeurs du prix du carbone nécessaires	Prix du carbone, valeur duale de la contrainte carbone Ajustement des demandes au prix global de l'énergie	Prix du carbone, valeur duale de la contrainte carbone, demandes exogènes

3. Comparaison des hypothèses de cadrage

Avant d'analyser plus en détail les résultats et les trajectoires décrites par les différents scénarios, nous nous proposons dans cette sous-partie de nous intéresser aux hypothèses de cadrage générales des différents exercices de manière à capter les grandes différences sur les hypothèses en général économiques, sur les objectifs et sur les trajectoires.

3.1. Caractéristiques générales

Le tableau suivant détaille les caractéristiques générales des scénarios que nous étudions : année de référence, horizon temporel, consommation d'énergie finale et émissions de GES.

Tableau 2 : Caractéristiques générales (horizon temporel, niveau d'émissions en 2050, consommation d'énergie finale, taux de croissance économique et prix du pétrole)

	Horizon temporel	Emissions en 2050 (MtC)	Réductions d'émissions (%/année de réf.)	Energie finale en 2050 (Mtep)	tcam ¹⁷ économique	Prix du pétrole
NégaWatt	2050	110	-77%	107	-	-
NégaTep	2050	129	-64%	135	-	-
MIES	2050	117-120	-69%	140-146	1,7%	-
PrévoT	2030	137	-63%	152	1,7%	Prix de référence choisi: 50\$/bl
ENERDATA	2050	125	-64%	116	2,3%	Le peak-oil disparaît suite à une diminution de la demande. 20 - 30 \$/bl en 2050
Syrota-Markal	2050	187	-55%	153	1,7%	2015 : 50-80\$/bl
Syrota-MedPro Poles	2050	162 (102 avec CCS)	-60% 74% avec CCS	100,5	2,3%	2015-2030 : 100-150\$/bl 2030-2050 : 100\$/bl

Il est à noter que seul le scénario négaWatt atteint le facteur 4. Les autres scénarios atteignent au mieux du facteur 3. Pour le scénario Syrota-Markal, le modèle peine « au-delà de ce facteur de réduction à trouver des solutions de substitution utilisables pour réduire davantage les émissions de CO₂ » (Rapport Syrota, 2007). Une valeur du carbone de 30k€/tC serait nécessaire pour atteindre un facteur 4. Le scénario Syrota-MedPro ne pourrait atteindre quant à lui un facteur 3,8 (scénario non retenu) que grâce au recours à la production d'électricité par des centrales à charbon associées à de la séquestration à hauteur de 60Mt en 2050. Hormis cela, les réductions obtenues sont celles mentionnées dans le tableau ci-dessus.

Il est à noter également que les scénarios négaWatt et négaTep ne donnent aucune indication sur le taux de croissance économique et le développement du pétrole car ils analysent surtout les aspects technologiques par rapport à leur faisabilité et non pas par

¹⁷ Le tcam est le taux de croissance annuel moyen

rapport aux coûts.

Nous allons dans la suite revenir plus en détail sur chacun de ces paramètres.

3.2. Objectifs de réduction, énergie finale et énergie primaire

Dans cette section, nous comparons les objectifs de réductions des émissions du CO2 et les grandes caractéristiques de l'évolution de la consommation énergétique en lien avec ces objectifs.

Mais avant cela, quelques éléments méritent d'être remarqués

- **Le facteur 4 n'est pas atteint.** Aucun des exercices ne fait du facteur 4 (Tableau 3) : le plus performant avec un facteur 3,6 est le scénario négaWatt suivi des projections de la MIES. Les autres scénarios atteignent au mieux du facteur 3. Il est à noter que le modèle Syrota-Markal peine « au-delà de ce facteur de réduction à trouver des solutions de substitution utilisables pour réduire davantage les émissions de CO2. La valeur carbone propre au modèle, utilisée pour comparer les solutions technologiques, diverge rapidement au-delà de 500€/tC » (Rapport Syrota, 2007). Une valeur du carbone, dans le modèle de 30.000€/tC serait nécessaire pour atteindre un facteur 4. Le scénario Syrota-MedPro ne pourrait atteindre quant à lui un facteur 3,8 que grâce au recours à la production d'électricité par des centrales à charbon associées à de la séquestration à hauteur de 60Mt en 2050. Sans cela, les réductions obtenues sont celles mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Récapitulatif des objectifs de réduction dans les différents exercices par rapport aux émissions de CO2 seul en 2000

	négaWatt 2006	négaTep 2007	Enerdata 2005	Prévot 2007	Mies 2004	Syrota - POLES 2007	Syrota - Markal 2007
Objectif de réduction	3,6	3,1	2,9	2,9	3,4	3	2,9

- **Seul le CO2 issu des émissions énergétiques est pris en compte** dans ces exercices, soit 75% des émissions françaises : le CH4 et le N2O émis par le secteur agricole ne sont pas considérés alors qu'ils ont un pouvoir de réchauffement bien supérieur au CO2, pouvoir de réchauffement qui est encore plus élevé si l'on se place dans une perspective de réduction des émissions à court ou moyen terme¹⁸.
- **Les seules émissions de GES prises en compte par convention sont les émissions émises sur le territoire** : elles comptabilisent les émissions produites pour les biens d'exportation, mais pas celles des biens d'importations. Selon Nakano et al. (2009), si

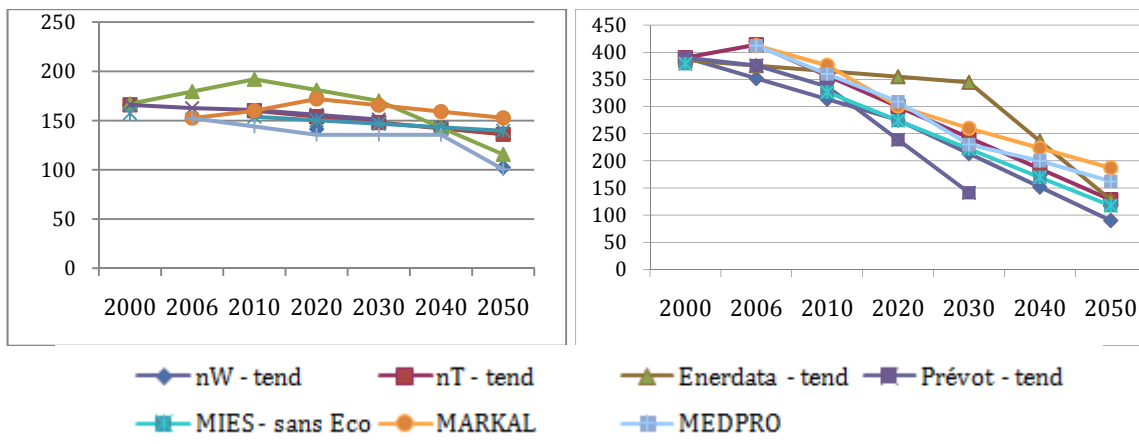
¹⁸ Par convention, ce que l'on appelle le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) calcule le pouvoir de réchauffement d'un gaz sur un horizon de 100 ans. Par convention les PRG du CH4 et du N2O sont donc de 21 et 298. Or comme ces gaz ont des durées de vie plus courtes que le CO2 dans l'atmosphère, leur PRG considéré sur un horizon plus court que 100 ans est supérieur. Pour un horizon de 50 ans il est respectivement de 42 pour le CH4. Si l'on se place dans la perspective d'un Facteur 4 en 2050, il faudrait raisonner avec des PRG sur un horizon de 40. Pour plus de détail, nous invitons le lecteur à se référer à l'article de B. Dessus et al., paru dans la Recherche (2008).

l'on comptabilise les émissions de la France sur la base de la consommation domestique (donc en incluant les importations et en excluant les exportations) et non sur la base de la production domestique, les émissions françaises seraient 30% supérieures. Aucun des exercices ne prend en compte ces « exportations » d'émissions alors qu'une forte contrainte carbone pourrait conduire à se reporter vers des biens importés de pays à contrainte carbone moins élevée.

Revenons à l'examen des trajectoires de consommation d'énergie et d'émissions dans les différents scénarios.

Les deux graphiques ci-dessous montrent qu'en dehors des objectifs « points d'arrivée » en 2050, les formes des trajectoires ne sont pas les mêmes. Il est à noter également que pour les scénarios de la MIES, le rapport ne fait pas état d'une trajectoire, mais d'un point de départ en 2000 et d'un point d'arrivée en 2050. D'autre part, en dehors de la différence sur les niveaux de réductions des émissions de GES (à droite), les écarts sur les niveaux de consommation d'énergie finale sont très importants entre une stabilisation pour le scénario et une diminution de l'ordre de 30% pour le scénario. Nous revenons en détail pour chacun des scénarios.

Figure 1 et 2 : Energie finale (à gauche) et émissions de CO2 (à droite) – scénarios de réduction



NégaWatt :

Les émissions diminuent de 390 MtCO₂ (106 MteqC) en 2000 à 90 MtCO₂ (24MteqC) en 2050. Ceci correspond à un facteur 4,3 (-77%). Le charbon disparaît pratiquement du mix énergétique (juste 5TWh en 2050 contre 177 en 2000), les ENR représentent 71% de l'énergie primaire et la sortie du nucléaire sera achevée en 2035. Par rapport au scénario tendanciel 2411 TWh de moins sont produits en 2050. Les émissions par habitant diminuent de 6,65tCO₂ à 1,4 tCO₂ en 2050. Les détails du bilan énergétique du scénario nW sont donnés dans les deux tableaux ci-dessous.

Tableau 4 : Energie finale – NégaWatt

Bilan Energie finale (TWh)	Tendanciel			NégaWatt		
	2000	2020	2050	2000	2020	2050
Energie finale par usage						
Electricité	382	509	699	382	389	377
Chaleur	878	939	992	878	755	506
Mobilité	563	670	853	563	409	241
Total	1823	2118	2544	1823	1553	1124
Sobriété				0	238	547
Efficacité				0	327	873
Total				0	565	1420
Energie finale par secteur						
Résidentiel	539	624	722	539	475	295
Tertiaire	221	284	369	221	195	145
Industrie-Agriculture	489	526	581	489	456	392
Transport	574	684	872	574	428	292
Total	1823	2118	2544	1823	1554	1124
Sobriété				0	238	547
Efficacité sur demande				0	327	873
Total				0	565	1420

Tableau 5 : Energie primaire - NégaWatt

Bilan Energie primaire (TWh)	Tendanciel			NégaWatt		
	2000	2020	2050	2000	2020	2050
Energie finale par usage						
Electricité	1277	1454	1790	1277	989	510
Chaleur	878	939	992	878	6+87	455
Mobilité	563	670	853	563	409	241
Total	2718	3063	3635	2718	2085	1206
Sobriété				0	238	547
Efficacité demande				0	327	873
Efficacité offre				30	426	1009
Total				30	991	2429
Energie primaire par source						
Gaz	431	718	1111	431	460	167
Charbon	177	103	88	177	66	5
Pétrole	920	1075	1277	920	602	206
Uranium	1061	1061	1061	1061	633	0
Renouvelables	198	201	210	198	402	958
Total	2787	3158	3747	2787	2163	1336
Sobriété				0	238	547
Efficacité demande				0	327	873
Efficacité offre				30	442	991
Total				30	1007	2411

NégaTep :

La consommation d'énergie finale était de 165,7 Mtep (hors électricité exportée) en 2000 pour un rejet de 115 MtC. Elle atteint 136 Mtep en 2050, soit une baisse de 18% par rapport à 2000 et de 47% par rapport à la tendance actuelle qui conduirait à 260 Mtep. Les émissions de cette consommation énergétique correspondent à un rejet de 35MtC, donc un facteur 4 – mais les auteurs admettent que ce chiffre est probablement surestimé et le vrai facteur sera plus proche d'un facteur 3. Le pic d'émissions a lieu avant 2020.

Les conclusions principales en comparant la situation en 2000 et le scénario facteur 4 négaTep pour 2050 sont :

- la consommation d'énergie finale se réduit de 47%,
- la consommation de ressources fossiles pour l'usage hors électricité est réduite d'un facteur 3,5,
- le nombre de TWh consommés augmente considérablement (de 450 à 725 TWh) – avec une multiplication par 22 des TWh utilisées pour le transport,
- les Mtep issues des énergies renouvelables triplent pour les usages hors électrique (11 à 35 Mtep) et en 2050 21% de l'électricité est issue des renouvelables (70 TWh – hydraulique et 50 TWh autres renouvelables – dont bois et déchets en cogénération ce qui pose la question de ce qu'on considère comme renouvelable) contre 13% en 2000.

La part du nucléaire reste comparable mais la puissance installée augmente significativement pour pouvoir produire 565 TWh en 2050 (contre 415 TWh en 2000).

MIES :

La consommation d'énergie finale en 2050 varie entre 140 Mtep pour les variantes « F4Turbine à gaz » et « F4 RCogN » et 260 Mtep pour la variante « Sans Eco ». L'électricité joue dans toutes les variantes un rôle important : de 57 Mtep pour la variante « F4 SN+S » à 97 Mtep pour la variante « Offre », soit entre 39 et 57% de l'énergie finale toutes variantes F4 confondues. La consommation d'énergie primaire en 2050 varie entre 180 Mtep pour la variante « F4Turbine à gaz » et 402 Mtep pour la variante « Sans Eco ». Ceci correspond à des rendements allant de 39% à 79%. Les variantes sans nucléaire « F4 sN+S » et « Turbine à gaz » présentent les rendements les plus élevés.

Les émissions de CO₂ en 2050 varient de 32 MtC pour toutes les variantes F4 (ceci correspondant à un facteur 3,3) à 146,08 MtC pour la variante « Sans Eco ». La variante « Turbine à gaz » n'atteint pas l'objectif du facteur 4 malgré son rendement élevé du fait de la part importante du gaz dans le mix énergétique.

Les émissions par point de PIB baissent significativement : pour une croissance du PIB de 130% entre 2000 et 2050 les émissions de CO₂ augmentent de 39% pour la variante « Sans Eco » et de - 66%

La variante qui développe énormément le nucléaire « F4 nucléaire » (+71%) arrive à atteindre le facteur 4 grâce à la mobilisation de l'efficacité énergétique et au déploiement des énergies renouvelables pour les besoins thermiques.

ENERDATA :

Le modèle POLES établit un équilibre offre-demande (entre plusieurs possibles) dans le cadre d'un facteur 4 au niveau des pays industrialisés qui se traduit pour la France, du fait de sa plus faible intensité carbone initiale, par un facteur 2,85 seulement.

La réflexion sur les orientations de la demande finale compatibles avec les scénarios de réduction a été menée selon les lignes directrices suivantes :

- pas de prise en compte des rétroactions du facteur 4 sur l'économie,
- exploitation maximale des potentiels techniques d'efficacité énergétique tels qu'ils sont connus aujourd'hui,
- recours en priorité aux énergies non émettrices de CO₂ (solaire, biomasse et déchets directs ou via la production de chaleur) et diminution des usages directs des fossiles hors gaz
- poursuite de la pénétration du gaz qui incorpore des quantités croissantes de biogaz et H₂ (issu du nucléaire).

Les énergies renouvelables contribuent pour 15% de l'énergie finale consommée en 2050, l'essentiel relevant de la biomasse sous différentes formes, malgré un rôle mineur dévolu aux biocarburants (4,36 Mtep). L'hydrogène se développe entre 2030 et 2050 pour atteindre une consommation finale de 5,4 Mtep. La part de l'électricité dans l'énergie finale augmente significativement de 19 à 42% entre 2000 et 2050. Par contre la production nucléaire n'augmentera que de 100 à 109Mtep (énergie primaire) sur la même période.

La majorité de l'effort de réduction sera effectué par le secteur du bâtiment (résidentiel/ tertiaire et agriculture). La consommation d'énergie finale est divisée par 2 et les émissions par 8. Le secteur du transport ne parvient qu'à stabiliser sa consommation d'énergie finale et ses émissions seront divisées par 2.

Concernant les mesures particulières adaptées pour pouvoir atteindre des réductions de consommation, il faut mentionner des technologies TBE (très basse énergie) introduites dans deux secteurs clés : les transports routiers (personnes et marchandises) et le bâtiment (domestique et tertiaire). Celles-ci reflètent l'impact potentiel des innovations majeures ou des changements de comportement qui pourraient découler de valeurs du carbone très élevées (c'est-à-dire supérieures à 100 €/tCO₂).

Tableau 6: Energie primaire et finale - Enerdata

Consommation Primaire (Mtep)	2001	2010	2030	2050
Total, dont:	259	265	245	194
Pétrole	94	106	87	35
Gaz	37	43	34	12
Charbon	12	6	4	1
Nucléaire	100	91	92	109
Renouvelables	16	19	27	38
Consommation Finale	2001	2010	2030	2050
Total, dont:	167	192	170	115,6
Pétrole	88	100	81	32,7
Gaz	33	44	35	11,6
Charbon	4	5	3	0,5
Électricité	32	31	36	49,1
Renouvelables & Chaleur	9	12	14	16,3
Hydrogène	0	0	0	5,4
Industrie, dont:	50	61	52	33,4
Pétrole	21	26	19	6,3
Gaz	14	18	17	10
Charbon	4	5	3	0,5
Électricité	11	12	14	16,6
Renouvelables & Chaleur	0	0	0	0
Transport, dont:	50	60	63	45,8
Pétrole	48	56	55	22,67
Gaz	0	0	0	0,64
Charbon	0	0	0	0
Électricité	1	2	4	12,64
Agro-carburants	0	2	4	4,36
Hydrogène	0	0	0	5,44
Rés - Tertiaire - Agri, dont:	68	71	55	36,5
Pétrole	19	18	8	3,7
Gaz	20	26	18	1
Charbon	1	0	0	0
Électricité	20	17	18	19,9
Renouvelables & Chaleur	9	9	11	11,9
RECAPITULATIF				
Consommation d'énergie primaire (Mtep)	259	265	245	194
Consommation d'énergie finale (Mtep)	167	192	170	115,6
Rendement énergétique	65%	72% ¹⁹	70%	60%
Emissions (MtC)	101	117	94	35
Facteur de réduction par rapport à 2000		0,86	1,07	2,85

¹⁹ Il y a une augmentation du rendement énergétique entre 2000 et 2010 qui est suivi d'une baisse car entre 2000 et 2010 la part de l'électricité dans l'énergie finale diminue légèrement (le rendement du nucléaire est particulièrement faible) pour augmenter ensuite (voire Tableau 6).

Tableau 7 : Facteur de réduction - Enerdata

MtC	2000	2010	2030	2050	Facteur de réduction 2000-2050
Industrie	32,62	40,87	31,63	12,78	2,55
Transport	43,20	50,40	49,51	20,84	2,07
Rés - Ter - Agri	31,29	33,13	18,94	4,02	7,78
Total	107,11	124,41	100,07	37,64	2,85

Prévoit :

2 scénarios de réduction sont proposés par Henri Prévot ; ils mènent à des consommations en énergie finale et à des émissions différentes²⁰. La consommation d'énergie finale en 2030 est de 151 Mtep (resp. 146 Mtep) et diminuera de 12 Mtep (resp. 14 Mtep) par rapport à la consommation en 2000. En revanche, les parts des sources d'énergie finale sont significativement modifiées.

Tableau 8 : Sources d'énergie finale en 2030 (en Mtep) - Prévot

Scénario	1	2
Charbon	4	3
Electricité	61	57
Biomasse chauffage	21	21
Chaleur solaire	5	13
Gaz	21	14
Biogaz	4	3
Biocarb.	22	19
Prod. Pétrol.	14	16
Total énergie finale en 2030	151	146
Emissions CO2 MtC	38,5	35,3

Les changements les plus importants par rapport à 2000 sont la part importante des agrocarburants et l'augmentation de la consommation d'électricité due au rôle de plus en plus important de l'électricité dans tous les secteurs (voitures hybrides, chauffage...).

Les émissions en 2030 seront de 38,5 MtC (resp. 35,3 MtC), soit un facteur 2,7 (resp. 2,9) par rapport à 2006. Ce facteur moins important que dans la majorité des autres scénarios est dû à l'horizon plus rapproché (2030).

Syrota :

Les deux scénarios de réduction MARKAL et MedPro- POLES plafonnent respectivement aux facteurs 2,1 et 2,4 en 2050 si l'on exclut la possibilité de mise en œuvre de la séquestration de carbone en France. A l'aide du CCS un facteur 4 peut être atteint.

²⁰ L'analyse de scénarios est fondée sur les tableaux publiés sur le site : <http://www.2100.org> qui varient légèrement des scénarios présentés dans le livre « Trop de pétrole » (2007).

Tableau 9: Tableau récapitulatif – Syrota MedPro-POLES

Energie finale	2006	2020	2050
Total	161,8	135,5	100,5
Transport	41,6	41,8	24,5
Rés. / tertiaire	70,6	63,3	52,4
Industrie / Agri	40	40	23,6
Energie primaire	2006	2020	2050
Total		262,5	222,5
		Dont exports 5,2	Dont exports 5,2
% ENR dans l'énergie primaire		9,8%	16,2%
Emissions MtCO2	2006	2020	2050
Total	412	309	162
Réduction en 2050 par rapport à 2006		1,3	102 (avec CCS) 2,5 3,9 (avec CCS)

Tableau 10: Emissions sectorielles MtC – Syrota MedPro-POLES

	2006	2020	2030	2050	Facteur de réduction 2006-2050
Industrie / Agri	111	49	44	25	4,44 (6,0 industrie seule)
Transport	139	96	56	34	4
Rés. / tertiaire	93	69	59	41	2,3
Energie	69	95	75	63	1,1

Tableau 11: Tableau récapitulatif – Syrota Markal

Energie finale	2006	2020	2050
Total	161,8	172,5	152,7
Transport	41,6	47,3	42,6
Rés. / tertiaire	70,6	65,1	55,7
Industrie / Agri	40		54,5
Energie primaire	2006	2020	2050
Total		277,5	278
% ENR dans l'énergie primaire		10,4%	15,4%
Emissions MtCO2	2006	2020	2050
Total	412	301	187
Réduction en 2050 par rapport à 2006		1,4	2,2

Tableau 12: Emissions sectorielles MtC – Syrota Markal

	2006	2010	2020	2030	2050	Facteur de réduction 2006-2050
Industrie / Agri	111	91	88	91	67	1,6 (1,9 pour l'industrie seule)
Transport	139	131	122	104	71	2,0
Rés. / tertiaire	93	88	70	39	28	3,3
Energie	69	51	21	22	21	3,2

Outre les données des tableaux ci-dessus, dans le scénario MedPro-POLES :

- sur la base des prix commission Énergie, une réduction de la consommation de 16 % en 2020 et de 38 % en 2050 par rapport à 2006 est atteinte.
- sur la base des prix endogènes au modèle, les réductions se limitent respectivement à 9 % et 35 %.

Ces résultats traduisent l'effet des fonctions d'élasticité de la demande par rapport aux prix de l'énergie majorés d'une valeur du CO₂, elle-même fonction de l'objectif de réduction des émissions recherchée.

Une discussion est menée quant au respect pour ces scénarios des objectifs du paquet climat-énergie européen (voir Tableau 12). Le scénario MedPro-POLES atteint l'objectif de réduction et l'objectif de d'amélioration de l'efficacité énergétique, par contre le scénario Markal de son côté ne permet que de répondre à l'objectif de réduction des émissions. A noter qu'aucun des scénarios ne permet de respecter l'objectif attendant au développement des ENR en 2020.

Tableau 13 : Comparaison des résultats des scénarios à 2020 et 2050 avec des critères de l'UE

Scénarios	Markal		MedPro-Poles	
	2020	2050	2020	2050
Critères de l'UE				
Emissions de CO ₂ (en 2020 -20% par rapport à 1990)	-23%	-52% (facteur 2,1)	-21%	-58% (F 2,4 hors CCS) -74% (F 3,8 avec CCS)
Efficacité énergétique (-14%/2005)	+6,6%	0%	-16%	-38%
Energies renouvelables : part du mix primaire 20% en 2020	10,4%	15,4%	9,8%	16,2%

3.3. Hypothèses économiques

Les hypothèses de cadrage économiques sont déterminantes dans la prospective Facteur 4 puisque croissance économique et niveau de demande d'énergie finale et d'énergie primaire interagissent à plusieurs niveaux. Ainsi, l'évolution du contenu en énergie de la croissance dépend de l'évolution structurelle de l'économie (parts respectives des secteurs industriels et tertiaires), et de l'évolution du progrès technique. Ainsi d'un côté, plus la croissance économique va être importante, plus la demande en énergie va être importante (via les consommations et les activités de production) ; de l'autre côté, plus de croissance va également conduire à davantage de progrès technique et donc à moins de consommations énergétiques des modes de production et des équipements.

Nous comparons et analysons dans cette section ces indicateurs de cadrage économique (croissance économique, contenu de la croissance et prix de l'énergie).

Tableau 14 : Croissance démographique, croissance économique, croissance par habitant

	Tcam* démographique	Population 2050	Tcam économique	Croissance par habitant	Revenu par habitant (base 100=2100)
Prévot (en 2030)	0,27%	64 (en 2030)	2,3%	2,13%	149 (en 2030)
négaWatt	0,12%	64 (INSEE 2001)			-
Négatep		65			-
MIES	0,12%	64 (INSEE 2001)	1,7%	1,58%	187
Markal	0,24%	70 (INSEE 2006)	1,74%	1,50%	181
Med-Pro	0,24%	70 (INSEE 2006)	1,74%	1,50%	181
Enerdata	0,12%	64 (INSEE 2001)	2,3%	2,18%	237

Note : * tcam : taux de croissance économique annuel moyen

Mis à part les scénarios Prévot et Négatep, les scénarios de population se basent sur les projections de population de l'INSEE : les scénarios antérieurs à 2006 sur les projections de 2001 et les autres sur les projections de 2006 qui prévoient 6 millions d'habitants en plus en 2050 par rapport aux projections antérieurs, soit 10% de population en plus. Ceci entraîne donc toutes choses égales par ailleurs une augmentation de 10% environ des besoins énergétiques.

Les scénarios négaWatt et négaTep ne donnent aucune indication sur les niveaux de croissance économique dans lesquelles se déroulent les scénarios de réduction des émissions. Ils projettent directement des niveaux de demandes en biens et service sans considération du niveau de richesse ou du prix de l'énergie.

Les hypothèses de croissance apparaissent contrastées surtout lorsqu'elles sont croisées avec les hypothèses démographiques : les hypothèses du scénario Enerdata conduisent à une croissance du revenu par habitant de 137% d'ici 2050, soit un taux de croissance annuel moyen de 2,18%. Comparativement sur les 30 dernières années, la croissance économique a été de 2,06% et la croissance du revenu par habitant de 1,56%. Mis à part le scénario Prévot, les autres scénarios sont donc plus en ligne avec le passé.

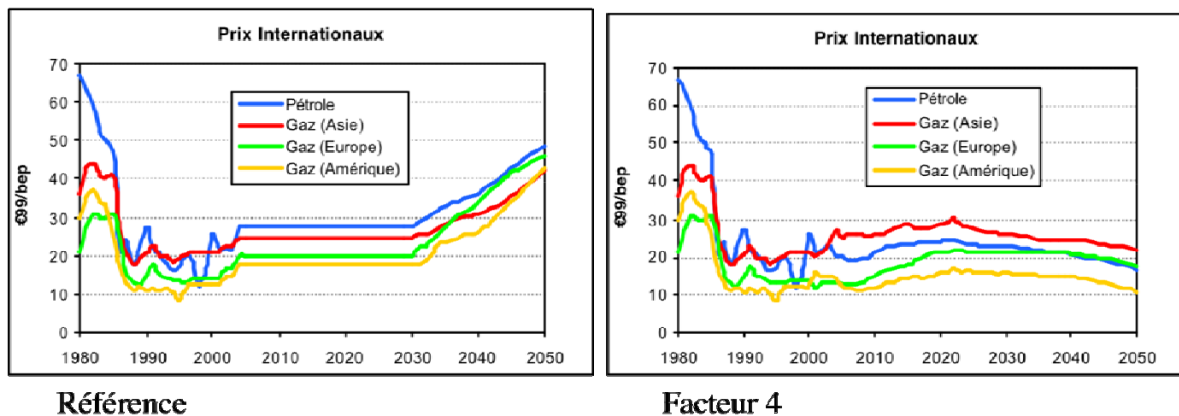
Les trajectoires d'émissions de GES, de consommations d'énergie et les choix technologiques sont indissociables des perspectives d'évolutions du prix de l'énergie carbonée au sens large (prix de la ressource + prix du carbone). Or, dans les exercices relevant d'analyse de données, le prix du carbone et l'évolution du prix de l'énergie sont absents de la résolution du mix énergétique en 2050 et une discussion est juste menée dans le meilleur des cas sur les valeurs du prix du carbone ou du prix de l'énergie aptes à induire les basculements technologiques décrits (négaTep, MIES, Prévot). Pour Prévot ce prix du carbone correspond au niveau permettant aux technologies non carbonées de pénétrer et aux consommations de se stabiliser. Pour conserver la compétitivité industrielle, ce prix du carbone ne doit pas s'appliquer aux industries et au transport de marchandises. Pour les scénarios de la MIES, la valeur du carbone retenue est celle permettant une stabilisation de la dépense énergétique en 2050 entre une variante sans économies d'énergie et les variantes facteur 4.

Les deux seuls scénarios avec un prix de l'énergie endogène, s'adaptant au contexte international de réduction des émissions de GES sont les scénarios construits avec le modèle

POLES, soit le scénario Enerdata et le scénario MedPro-POLES :

- dans le scénario Enerdata, le prix de l'énergie suit selon le niveau de consommation mondiale d'énergie et le rythme de découverte de réserves étant donné un niveau donné de réserves. Dans le scénario tendanciel, le peak-oil survient vers 2040 et conduit à un prix du pétrole élevé, alors que dans le scénario de réduction des émissions, la demande de pétrole baisse suffisamment pour permettre de maintenir le prix du pétrole entre 20 et 30\$/bl ; le peak-oil est repoussé après 2050 (Figure 3).

Figure 3 : Développement prix international du pétrole et du gaz - Enerdata



- Dans le scénario MedPro-POLES, les prix de l'énergie retenus correspondent à des trajectoires exogènes déterminées (Tableau 14) par une commission d'experts, de manière à assurer une certaine cohérence avec l'autre scénario du rapport Syrota élaboré avec Markal. La trajectoire retenue (entre 50 et 80 \$/baril jusqu'en 2015, entre 100 et 150 \$/baril de 2015 à 2030 et 100 \$/baril au-delà) correspond à un niveau 2 fois supérieur à celui de l'Agence internationale de l'énergie dans son WEO (2007), et sensiblement au même niveau que celui du Conseil Mondial de l'Energie (2007). Néanmoins, étant donné que le modèle MedPro-POLES calcule également un prix endogène, un scénario de référence alternatif a ainsi été construit, menant à un prix du pétrole endogène inférieur à celui retenu de manière exogène

Tableau 15 : Hypothèses de cadrage pour le scénario Syrota

	Scénarios 2030 DGEMP (2004)	Hypothèses des scénarios		
Croissance économique	+2,3%/an	+2,1%/an jusqu'en 2015 +1,8%/an pour 2015-2030 +1,6%/an pour 2030-2050		
Démographie	64 millions d'habitants	67 M hbts en 2030 70 M hbts en 2050		
Prix des énergies fossiles		2015	2015-2030	2030-2050
	Pétrole : 30\$/b	Pétrole (\$2005)		
		50-80\$/b	100-150\$/b	100\$/b
	Gaz naturel : 4\$/Mbtu	Gaz naturel		
		8\$/Mbtu	11\$/Mbtu	15\$/Mbtu
	Charbon : 40 à 50\$/t	Charbon :		
		60\$/t	90\$/t	120\$/t

Le prix du carbone, dans les exercices se basant sur des modèles, est une variable endogène. Pour les modèles POLES et Markal, le prix du carbone apparaît comme la valeur duale (c'est-à-dire la valeur implicite) de la contrainte carbone. Il correspondrait au prix du carbone qu'il faudrait appliquer au niveau de l'économie si aucune autre mesure n'était mise en œuvre, puisque les décisions orientant les déploiements technologiques sont dépendantes de bien d'autres variables que le seul signal prix. C'est la valeur nécessaire dans les modèles pour faire pénétrer les technologies permettant de répondre à l'objectif de réduction.

Or, il apparaît que les modèles POLES et Markal utilisés en l'état (avec les technologies et leurs hypothèses et avec les niveaux de demande introduits au préalable) buttent rapidement sur des niveaux de réduction des émissions trop faibles. Ainsi, dans le scénario Enerdata, le Facteur 3 n'est atteint qu'en introduisant de nouvelles technologies bas carbone et Syrota-Markal est obligé d'aller chercher des prix du carbone de 30.000€/tC pour faire pénétrer dans le mix énergétique des technologies non carbonées et réaliser effectivement du facteur 4. Ce résultat n'étant pas recevable, l'exercice réalisé avec Markal s'est limité à des niveaux de réductions moindres avec un prix du carbone restant dans le domaine de l'acceptable.

Ceci est révélateur de l'incapacité de ces modèles à représenter des bifurcations aux niveaux de la demande d'énergie. Avec de tels niveaux de réductions d'émission et de tels prix du carbone, il est peu envisageable de pouvoir se contenter de raisonner à demande exogène fixée pour Syrota-Markal ou avec une demande évoluant selon une élasticité prix de la demande calibrée sur le passé pour Enerdata et Syrota-Med-Pro alors que les demandes vont forcément connaître de fortes bifurcations et réorientations dans un contexte de Facteur 4.

3.3. Scénario de référence et scénario tendanciel

3.3.1. Introduction

Le scénario tendanciel ou de référence est un scénario marqueur par rapport auquel les politiques climatiques pour atteindre un certain objectif de réduction des émissions sont évaluées. Un scénario tendanciel prolonge les tendances observées (en termes de consommation d'énergie par exemple) ; un scénario de référence prend en compte les mesures déjà adoptées et devant être mises en œuvre. Il y aura bien sûr des interprétations fortement contrastées des mesures qui sont effectivement adoptées et qui devraient donc *de facto* être intégrées dans un scénario de référence. Que ce soit l'objectif de facteur 4 inscrit dans la loi française depuis 2005, ou les objectifs du paquet climat-énergie de l'UE ou de la programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité et de chaleur, ces décisions sont inscrites dans la loi, devraient-ils à ce titre être inclus dans un scénario de référence ? Non bien-sûr, puisque leur déclinaison en terme de mesure à mettre en œuvre n'est pas définie, ce qui est justement l'objet de ces exercices de scénarisation.

Par contre, certaines mesures sont d'ores et déjà prévues à l'avenir : ainsi nous savons que tous les cinq ans, la réglementation thermique est révisée et les objectifs renforcés

d'environ 15%. Les scénarios de référence doivent-ils prendre en compte ces évolutions réglementaires connues à l'avance ?

Ces questions ne sont pas abordées de la même manière dans tous les scénarios. Les scénarios tendanciels « Enerdata » de 2005 et les scénarios du rapport Syrota prennent explicitement en compte les décisions « additionnelles » prises en matière de climat et les détaillent. Ainsi, le rapport Syrota montre que les deux scénarios de référence n'atteignent aucun de trois objectifs du paquet climat énergie. Le scénario de référence « Enerdata » considère une progression de la réglementation thermique mais avec un délai d'apprentissage de 5 ans. Par contre, le scénario « sans éco » du groupe de scénarios « MIES » ne considère aucune amélioration de l'efficacité énergétique ce qui est en soi irréaliste.

Néanmoins, dans tous les scénarios de référence, la consommation énergétique en énergie finale augmente ainsi que les émissions puisque le recours aux énergies renouvelables reste limité.

3.3.2. Comparaison des scénarios tendanciels et de référence

Les figures 4 et 5 montrent les fortes disparités entre les niveaux de consommation d'énergie et d'émissions atteints dans l'ensemble des scénarios de référence. Ceci révèle en partie la différence d'interprétation entre un scénario tendanciel qui ne va que prolonger les tendances (comme le scénario négaWatt) et un scénario de référence prenant déjà en compte un certain nombre de mesures déjà mises en œuvre (comme pour les scénarios du rapport Syrota). De son côté, le scénario de référence d'Enerdata présente un pic d'émissions et de consommation en 2030 résultant d'un prolongement des tendances observées jusqu'en 2030 suivi d'une forte inflexion.

Figure 4 : Emissions CO2 des scénarios tendanciels

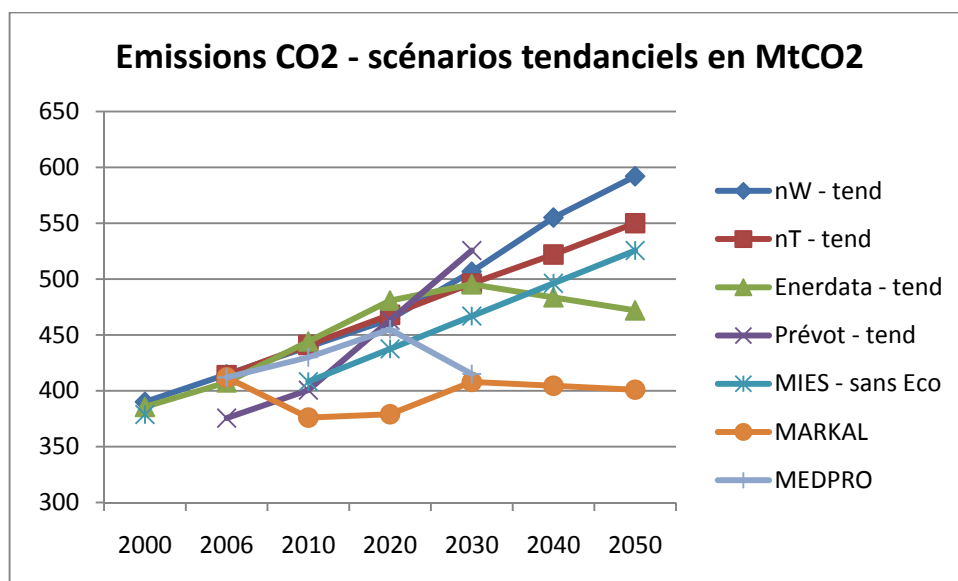
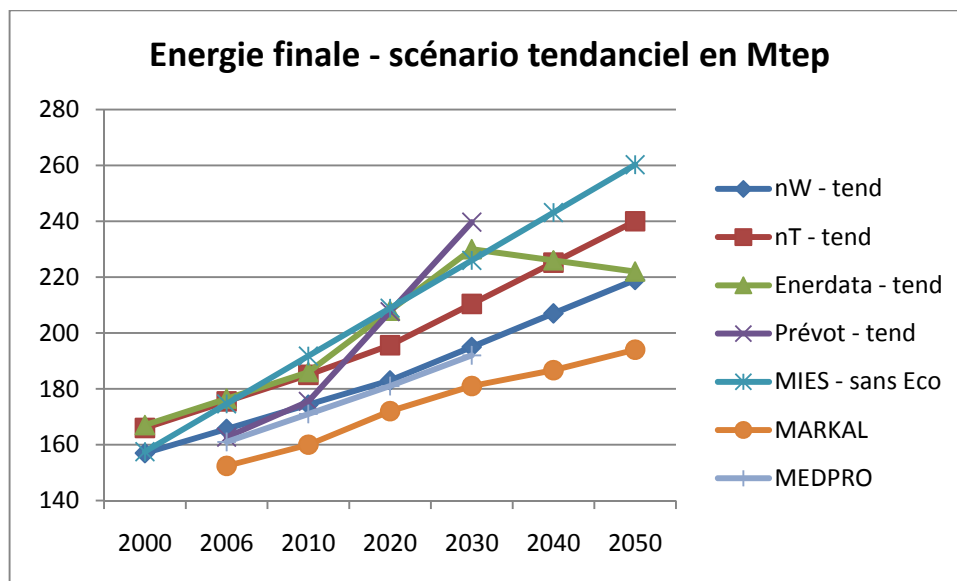


Figure 5 : Consommation énergie finale des scénarios tendanciels



NégaWatt

Le scénario de référence de négaWatt est un vrai scénario tendanciel basé sur le prolongement des tendances des consommations d'énergie. Les émissions du scénario tendanciel augmentent de 50%, la production nucléaire reste stable entre 2000 et 2050, la consommation du gaz triple presque, la part de l'électricité dans l'énergie finale augmente de 82%. L'énergie finale consommée augmente de 40% et l'énergie primaire de 33%.

NégaTep :

La poursuite de la tendance actuelle aboutit à une hausse de la consommation de 166 à 240 Mtep, avec une hausse de la consommation d'électricité de 50% par rapport à 2000 (à noter que ce niveau est inférieur à celui du scénario de réduction des émissions). Les consommations d'énergie finale (chaleur et électricité) augmenteront pour le transport de 40%, le secteur du bâtiment de 50%, le secteur industrie et agriculture de 23,3%. Le doublement de la consommation d'énergie fossile conduit à une hausse marquée des émissions de CO₂.

MIES :

Parmi les 19 variantes testées (8 mentionnées dans le rapport), il existe une variante sans aucun progrès d'économie d'énergie (notée « sans Eco ») au-delà des performances moyennes des équipements d'ores et déjà en vente, cette variante peut être considérée comme le scénario de référence. En outre, elle ne montre pas d'inflexion nouvelle des

tendances de substitution (au delà du remplacement spontané du charbon et du pétrole par le gaz, de la pénétration de l'électricité dans les procédés et les usages thermiques du bâtiment et du maintien de la position hégémonique du pétrole dans le transport.) Le rendement global s'améliorera ainsi de 34% en 2000 à 39% en 2050. Les émissions de ce scénario tendanciel sont de 146 MtC en 2050 et la consommation d'énergie finale est de 261 Mtep (402 Mtep énergie primaire).

Prévoit

Le scénario tendanciel utilisé ici reprend les résultats du « Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France » de la DGEMP. Il suppose un taux de croissance du PIB de 2,3% par an et une diminution de l'intensité énergétique de 1% par an. La consommation finale augmenterait donc de 47% (+77Mtep) et non pas une stabilisation comme dans le scénario facteur 2,8. La production d'énergie primaire s'accroîtra d'environ 130 Mtep (dont 10 Mtep de biomasse), la production d'électricité nucléaire restera stable. Les émissions augmenteront jusqu'à 146 MtC en 2030.

ENERDATA

Le scénario tendanciel s'articule autour de deux principes :

- toutes les mesures déjà prises, notamment dans le domaine de la réglementation et des accords volontaires, sont estimées pleinement suivies d'effet dans le scénario tendanciel
- ces mesures sont réputées conformes aux Directives européennes déjà en application ; les nouvelles Directives à venir n'entrent pas dans le champ du tendanciel ; le respect strict des engagements internationaux s'applique de-facto, mais la France n'exclut pas le recours aux instruments de flexibilité en cas de besoin.

Le scénario tendanciel est présenté comme n'étant « ni du souhaitable, ni du probable, c'est un étalon ». Les mesures considérées explicitement dans le scénario tendanciel sont rassemblées ci-dessous :

- Résidentiel, tertiaire
 - les RT-2000 et RT-2005 sont pleinement appliquées avec un délai d'apprentissage de 5 ans.
 - Accompagnement par la fiscalité et contrôle/sanction pour éviter les effets rebond sur les comportements.
- Transports
 - L'accord ACEA-2010 (140gCO₂/véh.km) s'applique pleinement à la France dès 2008 pour les voitures neuves avec surconsommation de 5% pour la climatisation.
 - Pas de renforcement après 2008 de la réglementation
 - Accompagnement par la fiscalité pour éviter les effets rebond sur la consommation.

- Industrie
 - Les accords volontaires signés sont supposés être respectés.
 - Permis négociables dans l'UE

Ce scénario de référence est aujourd'hui périmé avec les conclusions du Grenelle et l'adoption du paquet climat énergie de l'Union Européenne 2008.

Tableau 16 : Scénario tendanciel Enerdata

Consommation Primaire (Mtep)	2001	2010	2030	2050
Total, dont:	259	273	323	344
Pétrole	94	101	125	125
Gaz	37	38	69	48
Charbon	12	9	9	14
Nucléaire	100	109	99	126
Renouvelables	16	16	21	31
Consommation Finale	2001	2010	2030	2050
Total, dont:	167	186	230	222
Pétrole	88	95	115	110
Gaz	33	38	50	34
Charbon	4	6	7	7
Électricité	32	36	47	59
Renouvelables & Chaleur	9	10	11	12
Hydrogène	0	0	0	3
Industrie, dont:	50	55	75	69
Pétrole	21	23	31	30
Gaz	14	15	22	16
Charbon	4	6	6	7
Electricité	11	12	15	17
Renouvelables & Chaleur	0	0	0	0
Transport, dont:	50	57	74	79
Pétrole	48	55	71	71
Gaz	0	0	0	0
Charbon	0	0	0	0
Electricité	1	2	3	6
Renouvelables & Chaleur	0	0	0	0
Hydrogène	0	0	0	3
Rés - Tertiaire - Agri, dont:	68	73	82	76
Pétrole	19	17	13	9
Gaz	20	23	29	18
Charbon	1	1	1	1
Electricité	20	22	29	37
Renouvelables & Chaleur	9	9	11	12

Dans le scénario tendanciel, les émissions augmentent entre 2000 et 2030 (de 102,7 MtC à 137,6 MtC) puis décroissent jusqu'en 2050 à 131,3 MtC (soit une augmentation de 28% par rapport à 2000). Ces émissions suivent l'évolution de la consommation des énergies fossiles alors que la consommation de l'électricité et des énergies renouvelables augmente tout au

long de la période.

Le rendement du système énergétique reste stable entre 2000 et 2050 à 65% avec une hausse transitoire en 2030 à 71% correspondant à la baisse de la part du nucléaire. La part des énergies renouvelables reste quant à elle stable à 5,4% (non respect de l'objectif européen de 21% énergies renouvelables dans le mix énergétique de la France en 2020).

Les consommations énergétiques de tous les secteurs augmentent jusqu'à 2030. Par la suite, les consommations du secteur de l'industrie et du résidentiel / tertiaire/ agriculture baissent, seul le secteur des transports continue à connaître une hausse de ses consommations.

Syrota

Les demandes du scénario de référence MedPro-POLES sont un prolongement des tendances observées sur la dernière décennie. En 2030, la consommation finale d'énergie reste quasi constante avec la trajectoire de prix fixée par la commission Énergie et augmente de 16 % (+ 11 % à 2020) avec les prix endogènes du modèle. Par rapport à 1990, les émissions de CO2 augmentent de 3,5 % en 2020 et diminuent de 7 % en 2030 dans l'hypothèse des prix de la commission (+12 % en 2020 et 2030 avec les prix endogènes). Dans ce scénario, la production d'électricité nucléaire est limitée à 490 TWh, soit 65 GW de puissance installée. L'augmentation des émissions de CO2 en 2020 est principalement due au recours au charbon et gaz pour la production d'électricité. La réduction des émissions de CO2 obtenue en 2030 par rapport à 2020 résulte de l'effet combiné du renouvellement du parc automobile, de la part croissante des ENR (éolien en particulier) et d'une contribution accrue (+ 7 %) du parc nucléaire.

Le scénario de référence MARKAL s'appuie sur des hypothèses plus « allantes » pour le secteur du bâtiment : valorisation du quart du potentiel d'isolation dans l'ancien d'ici à 2050 (- 1 TWh/an), amélioration de la réglementation thermique dans le neuf au rythme actuel de - 15 % tous les cinq ans, ralentissement du taux de croissance des consommations d'électricité spécifique (+ 1,4 %/an au lieu de + 3 % actuellement) grâce aux gains en efficacité énergétique des équipements. Dans ces conditions, même si la croissance de la demande est de 20 % en 2020-2030, les émissions de CO2 diminuent de 3 % en 2020 par rapport à 1990. Au-delà de 2020, la réduction des émissions de CO2 est obtenue par un recours supplémentaire au nucléaire et au développement chaleur-biomasse dans le bâtiment. Les usages de l'électricité sont fortement croissants adossés à un parc nucléaire supplémentaire pour lequel l'acceptabilité reste une interrogation. De plus, l'impact réel des usages saisonniers sur le mix électrique et les émissions en CO2 n'est pas pris en compte. Par ailleurs, le paramétrage des sources d'énergie à fort rendement dans le résidentiel et l'industrie (chauffage gaz, cogénération, etc.) devra être vérifié avant de valider la pertinence d'un report massif des besoins vers les installations centralisées de production d'électricité.

Les deux scénarios de référence élaborés conduisent à une augmentation des émissions de CO2 en 2030, puis à une stabilisation des émissions à plus long terme, sous l'effet des normes et réglementations qui améliorent de manière continue les performances techniques (consommations unitaires des véhicules, performances thermiques des

bâtiments, etc.).

Tableau 17 : Comparaison des émissions de CO2 pour les scénarios Markal et MedPro-Poles

Emissions CO2	2006	2010	2020	2030	2050
Markal - tend	412	376	279	408	401
MedPro-Poles - tend	412	430	455	415	
Energie finale	2006	2010	2020	2030	2050
Markal - tend	152,4	160	172		
MedPro-Poles - tend	152,4	162	169		

Par contre les scénarios de référence ne permettent pas de respecter les 3 objectifs du paquet climat énergie.

Tableau 18 : Comparaison des résultats des scénarios de référence et volontaristes à 2020 avec les objectifs globaux de l'UE

Objectifs de l'UE / horizon 2020 (et 2050 pour Markal)	Markal de référence		Medpro-Poles de référence 2020
	2020	2050	
Emissions de CO2 : -20% / 1990	-3%	+2,5	+3,5% (Prix exogènes) +16% (prix endogènes)
Efficacité énergétique : -14% / 1990	+13%	+35%	+1% (Prix exogènes) +12% (prix endogènes)
Energies renouvelables : 20% du mix primaire	?	?	8,1% (prix endogènes)

3.4. Conclusion

Cette troisième section descriptive nous montre la grande diversité à la fois en termes de méthodologies et en termes d'hypothèses retenues pour la construction des scénarios de réduction. Il en ressort donc qu'il est difficile de mener une comparaison « toute chose égale par ailleurs ».

Les méthodologies mises en œuvre sont assez frustes pour la plupart des exercices. Seuls les scénarios Enerdata et du rapport Syrota sont basés sur un véritable exercice de modélisation, par contre seul Enerdata et MedPro-POLES du rapport Syrota permettent de représenter à la fois les bifurcations sur les modes de consommations et sur la demande d'énergie et l'impact des politiques climatiques sur le prix de l'énergie aussi que la valeur du carbone adossée à un objectif facteur 4.

Néanmoins, premier résultat intéressant, aucun des scénarios ne permet d'atteindre le Facteur4 sur l'ensemble des émissions « consommées » par les français. Comment doit-être compris ce résultat ? Comme une impossibilité ? Comme une preuve que les modèles ne sont pas assez flexibles ? Le paysage des scénarios énergétiques en France apparaît comme timoré par rapport à d'autres pays Européen. Ainsi, le scénario du ministère de l'écologie allemand suppose une réduction du CO2 de 85% en 2050 par rapport à 1990 (BMU, 2008) et le scénario « Zero Carbon Britain » présente une économie britannique sans aucune énergie fossile (zerocarbonbritain, 2007).

Dans la section suivante, nous examinons en détail les mesures conduisant aux réductions d'émissions, leur représentation au sein des scénarios, et les trajectoires sectorielles.

4. Analyse sectorielle

4.1. Introduction

Dans cette partie, nous passons en revue les évolutions sectorielles dans chacun des scénarios de manière à analyser à la fois l'évolution de la demande énergétique et du mix de production énergétique. Au niveau global, nous examinons la répartition sectorielle des efforts de réduction. Pour cela, nous comparons pour chaque scénario les réductions d'émissions par rapport au niveau observé en 2000 et nous menons une analyse à la Kaya²¹ en décomposant les émissions sectorielles selon l'évolution de la population, l'évolution de la demande d'énergie finale par habitant et le contenu en carbone de l'énergie finale entre 2050 et 2000.

$$E_{sect}^o(2050) = POP(2050) \cdot \underbrace{\frac{EF_{sect}(2050)}{POP(2050)}}_{\text{Consommation d'énergie finale sectorielle par habitant}} \cdot \underbrace{\frac{E_{sect}^o(2050)}{EF_{sect}(2050)}}_{\text{Contenu en carbone de l'énergie finale sectorielle}}$$

$$\log \frac{E_{sect}^o(2050)}{E_{sect}^o(2000)} = \log \frac{POP(2050)}{POP(2000)} + \log \frac{\frac{EF_{sect}(2050)}{POP(2050)}}{\frac{EF_{sect}(2000)}{POP(2000)}} + \log \frac{\frac{E_{sect}^o(2050)}{EF_{sect}(2050)}}{\frac{E_{sect}^o(2000)}{EF_{sect}(2000)}}$$

Cette décomposition nous permet de gommer dans l'analyse les hypothèses différentes sur l'évolution démographique. D'autre part, nous distinguons ainsi la contribution aux réductions d'émissions i) de la substitution énergétique capturée dans le coefficient d'évolution du contenu carbone de l'énergie finale et ii) de la diminution de la demande finale capturée dans le coefficient d'évolution de la demande d'énergie finale sectorielle par habitant, coefficient qui peut traduire soit des comportements plus sobres, soit des gains en terme d'efficacité énergétique.

²¹ Kaya, Y. (1990) "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios". Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris, (mimeo).

4.2. Transport

En 2000, la consommation du secteur du transport représentait 49,4 Mtep dont 48,2Mtep (97,6%) de pétrole.

NégaWatt

Dans ce scénario, la consommation finale du secteur des transports est quasiment divisée par deux en 2050 par rapport à 2000.

Tableau 19 : Bilan du secteur de transport en TWh - NégaWatt

Mobilité (TWh)	Tendanciel			NégaWatt		
	2000	2020	2050	2000	2020	2050
Energie finale						
Véhicules particuliers	279	335	396	279	196	90
Transport voyageurs	93	132	199	93	83	72
Transport marchandises	191	204	258	191	191	79
Total	563	671	853	563	470	241
Sobriété				0	144	271
Efficacité				0	117	341
Total TWh économisés						
Energie primaire nette						
Gaz						
Charbon						
Pétrole	560	667	849	560	371	181
Renouvelables	3	3	3	3	38	61
Total	563	670	852	563	409	242
Sobriété				0	144	271
Efficacité demande				0	117	341
Total TWh économisés				0	261	612

Tableau 20 : Indicateurs d'évolution du secteur des transports dans le scénario négaWatt

	Voitures particuliers			Véh utilitaires légers			Poids lourds		
	2000	nW 2050	Tend 2050	2000	nW 2050	Tend 2050	2000	nW 2050	Tend 2050
Parc 2050 (milliers)	27771	33097	39596	5051	5582	7851	432	456	588
Véhicules									
Conso 2050 l/km	7,61	3,3	5,84	9,7	7,94	8,78	37,5	29,19	32,27
Mobilité									
Distance parcourue (km)	13790	-0,55%							
Distance/an (kms)	13790	10744	18268	16012	14487	21162	48846	36365	56346
Total Gkms	383	356	723	81	81	166	21	16,6	33
Ecart/an/véhicule		-61 kms	90 kms						
Taux remplissage	1,4	1,65	1,4						
Gkms-pers	536	587	1013						
Ecart sur 2000		9%	89%						

Cette inflexion provient de deux canaux :

- Maîtrise de la mobilité se traduisant par un développement des modes doux et des transports collectifs. En conséquence, les distances annuelles des véhicules particuliers baissent de 24%, alors que la mobilité individuelle augmente de 9%.
- Augmentation de l'efficacité énergétique du parc moyen des véhicules particuliers (3,3l/100 km en 2050 contre 5,8l/100km dans le scénario tendanciel).

Au total, les économies d'énergie permises en 2050 par la sobriété et l'efficacité représentent respectivement 31% et 40% de la consommation finale en 2000. Le résiduel est constitué à $\frac{3}{4}$ de pétrole et $\frac{1}{4}$ d'agroc carburants.

NégaTep

Les émissions des transports baissent jusqu'à 15,7 MtC (facteur 2,9 par rapport à 2000). Pour cela, le scénario négaTep table sur le développement des transports en commun et une modification du comportement de chacun pour permettre de stabiliser les besoins au niveau de 2000, soit 50Mtep. Ceci correspond à une rupture avec la tendance actuelle (+1,4% par an) qui conduirait à 85 Mtep en 2050.

Par ailleurs, **agro-carburants** et **électricité** se substituent massivement au pétrole :

- L'utilisation de l'électricité peut être directe comme pour les transports en commun mais pourrait aussi s'étendre au transport individuel grâce au développement des véhicules 100% électriques ou hybrides rechargeables. **La consommation d'électricité dans le transport passe alors de 10 TWh à 220 TWh (de 6% à 96%).**
- Les agro-carburants contribuent à hauteur de 5Mtep. Avec le procédé de deuxième génération **15Mtep d'agroc carburants** pourraient être produits à partir de 5Mtep de biomasse **en utilisant 115 TWh (10Mtep) électricité** comme source d'énergie externe.

MIES

Dans le scénario tendanciel « sans Eco » les consommations doublent pratiquement (91 Mtep) en 2050. Sans effort de substitution et d'économie d'énergie, le transport représentera les 4/5 de l'accroissement des émissions en 2050. La projection du développement du secteur s'appuie sur une croissance moyenne de la demande de 1,7% par an (croissance soutenue jusqu'à 2020 puis décrochage de la croissance des trafics par rapport à la croissance économique).

La consommation du secteur des transports varie selon les variantes de 23,2 Mtep dans le scénario «RCogN» à 31 Mtep dans la projection « F4 Sequest ». L'hydrogène dans la variante « F4 H2 » permet de couvrir 5,78 Mtep des 26,96 Mtep (21% des besoins). La consommation d'électricité varie entre 2,1 et 12Mtep et celle du pétrole entre 6,8 et 19,8 Mtep.

Tous les scénarios qui atteignent un facteur 4 impliquent **un niveau maximal d'émissions de**

10MtC et cela n'est possible que si la part du pétrole dans l'énergie finale consommée par le secteur du transport est inférieure à 1/3. Ceci nécessite surtout un changement de motorisation des véhicules légers (voitures et camionnettes), induisant un changement concernant le type d'approvisionnement énergétique et un changement de modes de transport.

Les enjeux seront:

1. une consommation inférieure à **3L/100km pour les véhicules légers** (un débat sur les comportements de déplacements ainsi que sur le bridage des moteurs devra avoir lieu)
2. une contribution importante des **agrocarburants** (entre 8 à 14 Mtep pour les scénarios F4) en sachant qu'une telle production demandera jusqu'à ¼ de la surface agricole utile.
3. le développement d'une motorisation sans émissions de CO2 grâce à **l'électricité (surtout la voiture hybride) et l'hydrogène**. Le rapport mentionne les difficultés inhérentes à la production d'hydrogène nécessitant beaucoup d'énergie mais rien n'est dit sur le contenu en carbone de l'électricité utilisée pour les transports. La part de l'électricité dans le transport est la plus importante pour les deux variantes « F4 nucléaire » et « F4 RCogN » qui mettent l'accent sur le développement des énergies renouvelables.
4. l'incitation aux **transferts modaux** de la route et de l'aérien vers le rail. Pour cela les transports collectifs doivent être développés. Entre 500 et 1200 km de lignes hautes vitesse devront être construites comme alternative au transport aérien.
5. **l'optimisation de la mobilité du fait de l'aménagement du territoire** (localisation emplois, logement, services, commerces, loisir) en développant les nouvelles technologies de l'information et de la communication (télétravail, transfert de données – substitution de litres d'essence par des octets). Cette composante, à elle seule permettrait une diminution de 20% de la mobilité.

Tableau 21 : Principales caractéristiques des scénarios – volet transports - Mtep

Scénario	Consommation finale (Mtep)	Pétrole	Electricité	H2	Enr
2000	49,4	48,2	0,9	-	0,3
Sans Eco	91,3	86,1	2,3	-	2,9
F4 Nuke	25	7,5	10,4	-	7,1
F4 RCogN	23,2	7,5	12,0	-	3,7
F4 Sequest	31	19,8	5,3	-	5,9
F4 SN+s	28,8	13,9	7,4	-	7,4
F4 H2	27	14,4	6,8	5,78	

Prévoit

L'énergie finale consommée se réduit entre 2006 et 2030 de 8Mtep (51 aujourd'hui et 43 en 2030). Les émissions sont réduites à 12,5MtC en 2030 pour le scénario 1 soit un **facteur 3,6** par rapport à 2000, l'énergie finale est divisée par 1,2.

Le scénario 1 suppose que l'efficacité des véhicules à moteur thermique (véhicules particuliers et poids lourds) augmentera en 2030 de 18% (soit une amélioration annuelle de 0,7%), que les transports sur rail doubleront et que les distances parcourues hors rail augmenteront de 25%. 33% des carburants utilisés pour les transports non ferrés seront remplacés par l'électricité.

Au final, **agrocarburants (51%)** et **électricité nucléaire (18%)** domineront le mix énergétique. Le taux d'émission de l'électricité est de 0,09MtC/Mtep en 2030.

L'électricité sera utilisée par des véhicules hybrides²² sur des courts trajets d'environ 50km (70% des distances parcourues par les VP et les VUL). La consommation d'électricité pour le transport est de 5,8 Mtep d'électricité et 33 Mtep de carburants liquides (11 Mtep produits pétroliers²³, 22 Mtep d'agrocarburants) et 4 Mtep de gaz (3 Mtep gaz et 1 Mtep biogaz). Pour assurer la pénétration de ces agrocarburants, l'auteur insiste sur la nécessité pour le politique de relever le prix de l'énergie. Une centaine d'usines traitant 1,5Mt de biomasse par an devront être construites. Avec un rendement de production de carburant par hectare, net de toute consommation d'énergie fossile, de 2,5 tep/ha, 5Mha de la surface agricole devront être réorientés pour la production de biomasse-énergie (transport et chaleur). Les émissions dues aux pratiques culturales (engrais) et au changement d'affectation des sols ne sont pas prises en compte.

L'auteur ne considère l'hydrogène pour le transport comme solution possible en France car la production et le stockage de l'hydrogène sont extrêmement coûteux dans un pays bénéficiant de ressources en biomasse importantes.

Tableau 22 : Secteur du transport – Scénario Prévot

Scénario	Consommation finale	Pétrole	Agrocarburants	Electricité	H2
2006	51	49	0,7	1	non
2030	43	11	22	7,8	non

ENERDATA

Les émissions de CO2 du secteur des transports sont divisées par un **facteur 2,1** en 2050 par rapport à 2000. La demande d'énergie finale augmente jusqu'en 2015, se stabilise, puis décroît jusqu'à 45,8 Mtep en 2050.

Ces réductions en 2050 s'expliquent par :

- Un **report modal** vers les transports collectifs pour les passagers et les transports non routiers pour les marchandises :
 - Equipement et usage de l'automobile en 2050: ménages 1 pers : 12 000km/an, monoparental: 15000km/an, 2 pers: 21000km/an, >2pers: 25000km/an

²² Le scénario retient l'équivalence de 1 tep d'électricité pour 3 tep de carburant.

²³ Comme la quantité de produits pétroliers disponible pour tous les secteurs n'est que de 14 Mtep, un recours aux agrocarburants est indispensable dans ce scénario.

- Trafic collectif passagers par personne par an multiplié par 3,35 entre 2000 et 2050 (2000km/an/pers en 2001 à 6700km en 2050), dont les 2/3 en TGV (4466,6km)
- Le tonnage transporté par voie fluviale est multiplié par 3,5 et par rail par 5,1.
- Des substitutions énergétiques vers l'électricité, les agrocarburants et l'hydrogène. 6 différents types de véhicules domineront le marché : principalement **les véhicules électrique, hybride et thermique à hydrogène**. Les hypothèses technologiques retenues technologie sont celles d'un basculement du paradigme technologique moteur à combustion interne / pétrole vers un nouveau paradigme propulsion électrique / production d'électricité embarquée. Ces évolutions vers des technologies « Très basses émissions » ne sont viables qu'avec un prix du carbone supérieur à 100€/tCO₂.
- Une diminution des taux d'émissions des véhicules de 140 gCO₂/km (accord ACEA) en 2008 à **30 gCO₂/km en 2050**. En 2050, seuls 20% du trafic automobile est constitué de véhicules classiques.

Tableau 23 : Développement énergie finale - Enerdata

Mtep énergie finale	2000	2010	2030	2050
Transport, dont:	50	60	63	45,8
Pétrole	48	56	55	22,67
Gaz	0	0	0	0,64
Charbon	0	0	0	0
Électricité	1	2	4	12,64
Agrocarburants	0	2	4	4,36
Hydrogène	0	0	0	5,44

Tableau 24 : Secteur du transport - Enerdata

MtC	2000	2010	2030	2050	Facteur de réduction
Transport	43,20	50,40	49,51	20,84	2,07

Syrota

Les deux scénarios du rapport donnent conduisent à des facteurs de réduction des émissions (4,7 pour MedPro-POLES contre 2,3 pour MARKAL) et de l'énergie finale (diminution de 41% /2000 pour MedPro-POLES contre une stabilisation pour MARKAL) dans le secteur des transports fortement contrastés.

MedPro-POLES présente les hypothèses les plus volontaristes (voir le tableau ci dessous). Au-delà de la stabilisation du trafic retenu entre 2025 et 2050 dans les hypothèses communes, le modèle fait le choix d'un fort **développement de l'usage de l'électricité** entre 2020 et 2050 : 20 % en 2030 et 60 % en 2050. Ce choix se cumule avec la **réduction de 50 % des consommations unitaires des véhicules conventionnels**.

Dans **MARKAL**, avec une hypothèse de stabilisation du trafic, le modèle conserve jusqu'en 2035 les véhicules actuels (avec une amélioration tendancielle de leurs performances). Au-delà, l'hybride essence/gaz naturel véhicule (plutôt qu'électrique) et les agrocarburants se

développent très rapidement.

Tableau 25 : Hypothèses d'évolution du secteur transport dans les scénarios Med-Pro et Markal

Hypothèses sectorielles : TRANSPORT	MedPro-POLES	MARKAL
Trafic de passagers	Constant entre 2025 et 2050	
Trafic de marchandises	-20% entre 2025 et 2050	
Hypothèses techniques	Baisse tendancielle des consommations de véhicules en moyenne -50% en 2050	
	Part de véhicules hybrides rechargeables et électriques ou hybrides électriques >20% en 2030 60% en 2050	Choix des technologies par les modèles dont véhicules hybrides rechargeables et véhicules au gaz naturel (GNV)
Carburants	Biocarburants génération 1 : 4 Mtep/an Biocarburants génération 2 : 10 Mtep/an Hypothèses correspondant à une couverture des besoins en carburant de l'ordre de 25% en 2050	

Tableau 26: Estimation des gisements de réduction des émissions de CO2 dans les transports qui a servie de base à l'élaboration des hypothèses pour Markal et Med-Pro

Objectifs d'amélioration	Mesures	Exemples	Gain/an à 2025
Processus	Intermodalité longue distances	3*600km autoroutes ferroviaires	0,5 MtCO2
		1600 km LGV CIADT 2003:	0,4 MtCO2
		-2000 km autoroutes nouvelles CIADT 2003	2,6 MtCO2
		-10km/h vitesse	0,6 MtCO2
	Collectif urbain	+20% collectif aires urbaines >300000 hab.	0,8 - 1,1 MtCO2
Urbanisme	Action sur l'urbanisme/ imitation de l'étalement urbain	2,5 MtCO2	
Report des déplacements	Réduction du trafic lié par exemple à une hausse de prix	3-16 MtCO2	
Composants	Carburants	Remplacement de 20% du pétrole par des biocarburants	28 MtCO2
	Efficacité	Mise aux normes du parc existant à 120 g CO2/km	13-32 MtCO2
Systèmes	Innovation	Véhicule TBE (très basse énergie) sur 20% du parc	2,5-3,5 MtCO2

Source : Task force transport – commission énergie

Tableau 27 : Evolution dans les scénarios Med-Pro et Markal de la consommation d'énergie finale et des émissions des transports

		2010	2020	2030	2050	Facteur de réduction par rapport à 2000
Energie Finale (Mtep)	MARKAL		47,3		42,6	1,2
	Med-Pro		41,8		24,5	2
Emissions (MtCO2)	MARKAL	131	122	104	71	2,3
	Med-Pro		96	56	34	4,7
Emissions avec Elec (MtCO2)	MARKAL				71,3	
	Med-Pro				40,2	

Analyse comparative

Le scénario menant aux plus fortes réductions dans le secteur des transports (Tableau 26) est le scénario MIES-F4 Nuke suivi de peu par le scénario MIES F4 RcoGN. Les contributions aux baisses d'émissions du fait de la baisse de la consommation d'énergie finale par habitant et du fait de la baisse du contenu en carbone de l'énergie finale sont à peu près équivalentes, et ce dans les deux scénarios (Figure 6).

La contribution de la **diminution du contenu carbone de l'énergie finale** consommée dans les transports est très importante pour les quatre scénarios MIES F4 Nuke, MIES F4 RcoGN, négaTep et H. Prévot. Ceci est dû à la très **forte pénétration de l'énergie électrique** dans le secteur des transports pour négaTep (90%), MIES F4 Nuke et MIES F4 RcoGN, et à la place prépondérante des agrocarburants dans le scénario H. Prévot (51% - pour la production des 22 Mtep agrocarburants il faut ajouter 13,93Mtep électricité comme source externe). Sur ce dernier point, il est regrettable que le scénario de H. Prévot ne mentionne pas les limites de la pénétration des agrocarburants du fait non seulement de la compétition avec l'usage alimentaire, mais aussi du fait des émissions de GES induites par les procès industriels permettant la transformation des produits agricoles en carburants, par les émissions des cultures énergétiques et par les changements d'usages des terres. Ceci relativiserait grandement le résultat obtenu. Nous voyons dans ce graphe (Figure 6) que **le scénario avec hydrogène MIES F4 H2 ne permet pas de faire baisser significativement le contenu en carbone de l'énergie consommée dans les transports.**

La Figure 6 montre également que les résultats butent sur des visions différentes concernant les gains potentiels pour la réduction de la consommation d'énergie finale par habitant. **Le scénario négaTep projette même une hausse de cette consommation.** Les scénarios MedPro, Enerdata et Markal y accordent une place limitée, sans doute du fait de la structure même des modèles qui ne permettent pas des inflexions notables de la demande d'énergie et de changement de comportement.

Le scénario négaTep présente **la part de l'électricité** la plus élevée de tous ces scénarios²⁴ mais le facteur de réduction des émissions reste pourtant comparativement faible (2,8). Ceci paraît étonnant puisque 80% de l'électricité est d'origine nucléaire et donc peu émissive. Ceci s'explique par la hausse de la consommation finale du secteur de transport, hausse observée uniquement pour ce scénario.

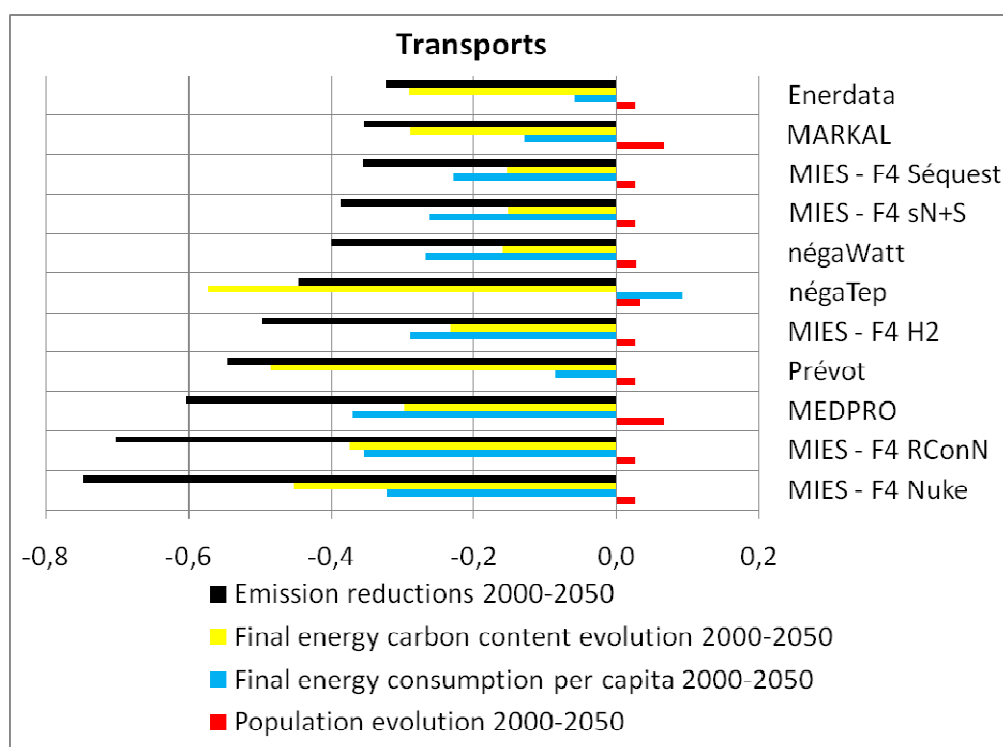
Au final, ce qui est intéressant, c'est que même si toutes les *storylines* des scénarios décrivent une société avec modération de la demande de mobilité et gains en efficacité énergétique, on se rend compte qu'une même *storyline* peut se traduire par des résultats forts différents.

²⁴ Par manque de données, le scénario négaWatt n'a pu être intégré à cette analyse.

Tableau 28 : Emissions en 2050 dans le secteur des transports dans les scénarios et facteur de réduction par rapport à 2000

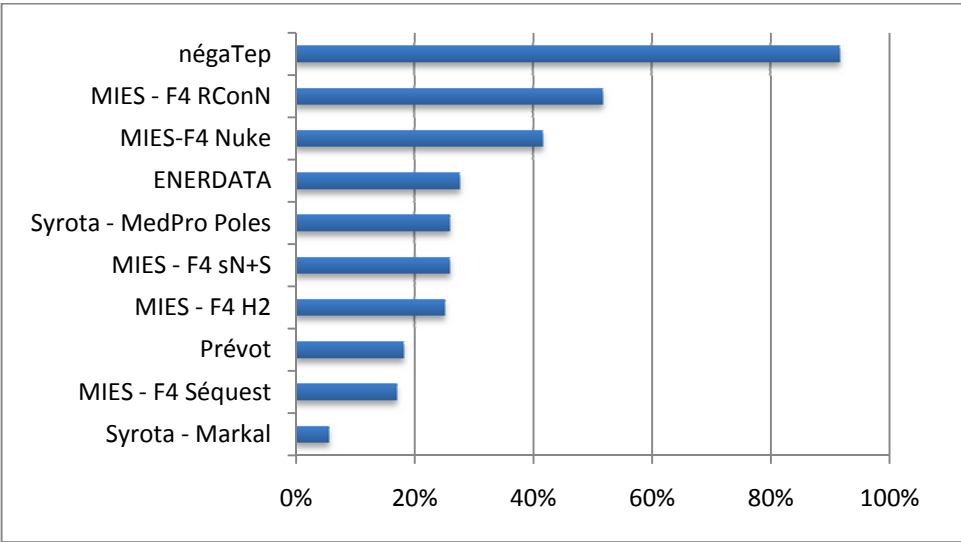
Transport – émissions en 2050		FACTEUR /2000
2000 en MtCO2	161	
MIES - F4 Nuke	28,3	5,7
MIES - F4 RCogN	31,4	5,1
MEDPRO	40,2	4,0
Prévot - en 2030	45,8	3,5
MIES - F4 H2	51,4	3,1
nT	57,6	2,8
nW	64	2,5
MIES - F4 sN+S	64,8	2,5
MIES - F4 Séquest	69,6	2,3
MARKAL	71,3	2,3
ENERDATA	76	2,1

Figure 6 : Décomposition à la Kaya des réductions d'émissions dans le secteur des transports



Note : Décomposition à la Kaya des réductions d'émissions dans le secteur des transports entre 2000 et 2050 dans les différents scénarios selon la contribution de l'augmentation de la population (barre rouge), l'évolution de la consommation d'énergie finale par habitant (barre bleue) net l'évolution du contenu carbone de l'énergie finale (barre jaune)

Figure 7 : Part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale dans les transports en 2050 dans les différents scénarios (2030 pour Prévot)



4.3. Bâtiment (résidentiel, tertiaire)

En 2000, les consommations énergétiques du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représentaient 66Mtep soit 42% de l'énergie finale consommée en France et 20% des émissions de CO₂.

NégaWatt : Efficacité énergétique et sobriété

Par rapport au scénario tendanciel, la consommation finale est divisée par plus que deux en 2050 (39% par rapport à 2000), cette baisse étant composée à 3/4 de gains en efficacité énergétique et à 1/4 de sobriété.

C'est sur le volet des bâtiments que le scénario négaWatt est le plus performant avec un grand détail technique et une représentation très précise

- du parc existant et de la montée en puissance des rénovations thermiques de l'habitat ancien : rénovation de 90% des logements construits avant 1975 ; en 2050 la consommation moyenne de chauffage du parc résidentiel et tertiaire atteint 55kWh/m² (ce qui tenant en compte de l'inertie pour la mise en œuvre de la réhabilitation est supérieur au potentiel technique de 30kWh/m² réalisable dès maintenant) ;
- des mesures d'efficacité énergétique sur les consommations d'électricité spécifiques (y compris l'efficacité énergétique des usages futurs) ;
- le développement des ENR décentralisées et des usages de la biomasse avec de nouvelles filières (méthanisation, biogaz agricole, cultures énergétiques),
- le développement des chaufferies collectives, en partie avec cogénération.

Tableau 29 : Bilan du secteur Habitat et Tertiaire en TWh

Bâtiments (TWh)		Tendanciel			NégaWatt		
		2000	2020	2050	2000	2020	2050
Energie finale							
Electricité	Résidentiel	129	174	241	129	119	89
	Tertiaire	101	136	190	101	93	65
Chaleur	Résidentiel	411	451	481	411	356	198
	Tertiaire	120	147	179	120	101	80
Total		761	908	1091	761	669	432
Energie primaire par usage							
	Résidentiel	841	947	1099	841	627	310
	Tertiaire	458	537	665	458	329	159
Total		1299	1484	1764	1299	956	469

Les besoins de chaleur sont également réduits du fait de la réduction de la surface des logements neufs (passant de 117m² à 75m² en 2050), de mesures techniques permettant la réduction des consommations d'eau chaude.

La généralisation du solaire thermique, des réseaux de chaleur distribuent en 2050 la moitié de la chaleur consommée dans le résidentiel/tertiaire.

NégaTep : peu d'efficacité, beaucoup d'électricité

Le scénario suppose une rupture forte avec de la tendance actuelle de croissance des consommations énergétiques dans ce secteur (+1,2% par an²⁵).

Tableau 30 : Secteur résidentiel – scénario négaTep

	Chauffage (Mtep)	Chauffage électrique (Mtep)	Electricité spécifique (TWh)	Emissions (chauffage + électricité spécifique)
Tendanciel	180		270	15,7
Réduction	46	10 (21,7%)	150	8,7
2000	59	10 (16,9%)	167	33

Entre 2006 et 2050, **la part du chauffage électrique augmente légèrement de 16,9% à 21,7%**, par contre la consommation d'électricité spécifique diminuera de 10%.

Se référant aux observations passées les auteurs considèrent que, du fait de l'accroissement de la taille des logements, du nombre de m²/hab., du vieillissement de la population qui contribue à faire relever les températures moyennes (1°C de plus représente 8% de plus de consommation), de la multiplication des cellules monoparentales ou des personnes seules et de l'augmentation de la population française de 8% à 65 millions d'habitants, le **renforcement de l'isolation thermique ne suffira pas** pour atteindre les objectifs de réduction des émissions et de consommation

C'est pourquoi les consommations de chaleur ne diminueront que de 18% et **qu'il faudra avoir recours à des sources énergétiques décarbonées** pour permettre d'atteindre un facteur 2 en 2050 sur ce secteur. Les ENR pourront fournir 36 Mtep de chaleur :

- Le bois et divers déchets agricoles et ménagers²⁶ pour le chauffage individuel et des réseaux de chaleur pourront doubler pour arriver à 20Mtep.
- Le solaire thermique pourra fournir 34% de l'eau chaude sanitaire (9-10 Mtep).
- 9 Mtep par les pompes à chaleur en assurant une fourniture associée de 25 TWh d'électricité (pas forcément produite par des énergies renouvelables)
- 0,2Mtep par la géothermie profonde et semi-profonde.

²⁵Ce qui amènerait à une consommation de chaleur directe de 95Mtep et de 270 TWh d'électricité spécifique.

²⁶Il reste à discuter sous quelle condition ils peuvent être considérés comme énergies renouvelables.

MIES : forte pénétration des ENR et du chauffage électrique - Stabilisation de l'énergie finale

L'accroissement du parc de logements de 1% et du parc tertiaire de 2% par an tire les consommations d'énergie à la hausse. Dans un scénario tendanciel « sans Eco » les consommations atteindraient 105 Mtep en 2050 contre 67 en 2000. Les scénarios F4 permettent de stabiliser la consommation d'énergie finale de ce secteur à 63-65Mtep, ceci grâce à la mise en œuvre d'une réglementation thermique exigeante et d'un programme ambitieux de rénovation thermique du bâti ancien à 50kWh/m2/an.

Plusieurs options et orientations sont retenues suivant les variantes :

- **Passage massif au chauffage électrique.** Ceci pose le problème inhérent aux pics de consommation en hiver assurés par des moyens de production de pointe basés sur des combustibles fossiles.
- **Développement des ENR thermiques.** Avec un potentiel de développement de 25 Mtep, elles pourraient couvrir la moitié des besoins (bois énergie : 15Mtep, solaire thermique : 6Mtep).
- **Développement de la cogénération.** La petite cogénération produira l'électricité de pointe à partir d'énergies fossiles mais à très haut rendement.

La part des énergies renouvelables est au minimum de 30% dans tous les scénarios, elle est la plus importante dans la variante « F4 hydrogène » avec 30,91 Mtep (48% de la consommation d'énergie finale). La part de l'électricité est elle aussi partout importante avec au minimum 40-41% (25-26Mtep) dans « Turbine à gaz » et « F4 sN+S » montant jusqu'à 59% (37,6Mtep) dans « F4 nucléaire » ou 63% (40Mtep) dans « F4 Séquest ».

ENERDATA²⁷

Les émissions de CO₂ et l'énergie finale augmentent jusqu'en 2010 avant de décroître jusqu'en 2050 et sont divisées respectivement par 8,2 par rapport à 2000 (7,8 par rapport au niveau de 1990) et 1,9 par rapport à 2000 (36,5 Mtep). Le recours à l'électricité et ENR aux limite en 2050 l'utilisation des énergies fossiles et la part de l'électricité grimpe de 29% en 2000 à 54,5% en 2050.

²⁷ Dans POLES, les émissions sectorielles du résidentiel, du tertiaire et les émissions liées à l'énergie du secteur agricole sont agrégées.

Tableau 31: Secteur Résidentiel –Tertiaire – Agriculture - Enerdata

Consommation d'énergie finale Mtep Rés - Tertiaire - Agri, dont:	2000	2010	2030	2050
		68	71	55
Pétrole	19	18	8	3,7
Gaz	20	26	18	1
Charbon	1	0	0	0
Électricité	20	17	18	19,9
Renouvelables & Chaleur	9	9	11	11,9

Tableau 32 : Facteur de réduction - Enerdata

MtC	2000	2010	2030	2050	Facteur de réduction
Rés - Ter - Agri	31,29	33,13	18,94	4,02	7,78

Le détail du contenu des mesures représentées dans le scénario Enerdata est représenté dans le tableau ci dessous.

Tableau 33 : Hypothèses secteur Résidentiel et Tertiaire - Enerdata

Hypothèses	Scénario de réduction « POLES »
	Résidentiel
Démolition	0,5%/an
Rénovation	1,5%/an
Performance thermique des habitations	RT2000 et RT 2005 appliquée : - Rénovation thermique : -30% sur la consommation du chauffage (pour les bâtiments construits avant 1980) - logement neuf très basse conso (20kWh/m2) % dans la construction neuve : 33% en 2010 66% en 2020 100% en 2030
Taux de raccordement au réseau de chaleur (bois ou déchets)	20% en 2050
Pose de chauffe eau solaire	- Toutes les maisons neuves équipées dès 2007 - 25% des maisons anciennes équipées tous les 10 ans - Chauffe eau solaire réduit 70% des besoins, le reste électricité - La moitié des immeubles neufs équipée après 2010 fournit 50% des besoins
Électricité spécifique	+ 20% (une réduction des consommations unitaires des appareils électroménagers classiques est surcompensée par des nouveaux appareils)
Tertiaire	
Démolition	1,5%/an
Rénovation	3%/an
Taux de raccordement au réseau de chaleur (bois ou déchets)	20% en 2050
Performance thermique du tertiaire	Idem habitat

La projection de la demande d'énergie du secteur résidentiel repose sur l'hypothèse de 30 millions de logements occupés en moyenne par 2pers/logt.

L'hypothèse d'un taux de raccordement important des immeubles aux réseaux de chaleur peut paraître contradictoire avec celle d'une forte baisse des consommations unitaires de chauffage. Une telle baisse rend en effet les solutions fortement capitalistiques moins compétitives (réseaux de chaleur, chauffage central à eau chaude...) par rapport au chauffage électrique, cependant :

- Les réseaux de chaleur sont un moyen économique de valoriser l'énergie des déchets urbains et industriels, la géothermie basse enthalpie et la biomasse,
- la compétition face aux autres énergies dépend de leur teneur globale (directe et indirecte) en carbone.
- ces solutions permettent d'atténuer la problématique des pics de consommations électrique pour le chauffage en hiver.

Un maintien des comportements de confort actuels pour le chauffage et la quête d'un confort accru pour l'eau chaude, la climatisation, l'électricité spécifique sont supposées conjointement à la croissance du revenu. La part du budget dédié aux dépenses énergétiques n'augmente pas néanmoins, malgré la montée des prix de l'énergie incluant le prix du carbone. La sobriété énergétique n'est pas prise en compte dans le cadre de ce scénario même si les auteurs reconnaissent qu'elle représente une source d'économies possibles.

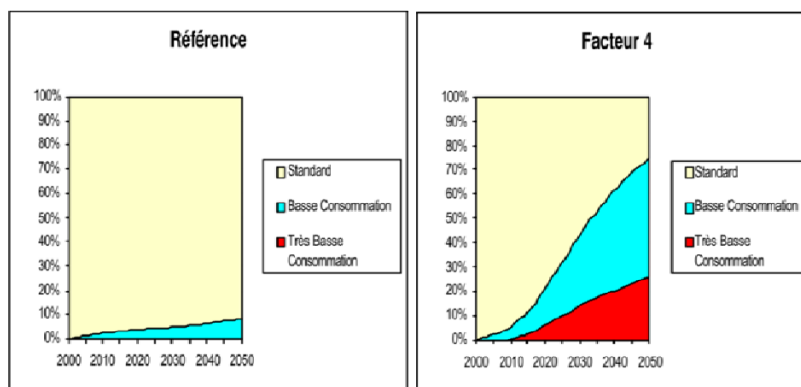
3 types de bâtiments sont considérés :

- Standard : moyenne de consommation avec progrès technique (RT)
- Basse consommation : (neuf et réhabilitation), -50% de la consommation standard
- Très basse consommation (neuf), 1/4 de la consommation standard

En 2050 100% de la construction neuve correspondra au type « Très basse consommation ». Ceci conduit à une évolution du parc de bâtiment décrit dans les graphiques ci-dessous.

Figure 8 : Développement type de bâtiments – Enerdata

Diffusion



Prévoit : stabilisation énergie finale, chauffage bi-énergie

La consommation finale du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire confondu) en 2030 se stabilise à 66Mtep dont 50 Mtep pour le chauffage et 16 Mtep pour l'électricité spécifique, soit une baisse de 8Mtep pour les usages thermiques et une augmentation de 3Mtep pour l'électricité spécifique (du fait de la climatisation), sachant qu'aujourd'hui la consommation pour le chauffage augmente de 1% par an et de 2,3% pour l'eau chaude.

La diminution des émissions se fait grâce à une **production d'électricité très décarbonée** :

- **la part de l'électricité pour le chauffage** augmente de 11 à 19 Mtep, soit une part de 38% du chauffage électrique
- l'utilisation de la **biomasse** (8,9 à 15 Mtep) et du **solaire** (5 Mtep) augmentent
- des **chauffages bi-énergie** lissent les pics de consommation en hiver.

Les gains en efficacité énergétique ainsi qu'en diffusion technologique sont assez frustes : Les usages thermiques dans le résidentiel et tertiaire baissent de 14%, soit une baisse de 0,55%/an du fait du renforcement des réglementations thermiques des bâtiments existants et de l'application des normes actuelles pour la construction de l'habitat neuf et de diffusion de chaudières plus efficaces.

Le scénario prévoit un recours limité aux réseaux de chaleur et pas d'utilisation de chaleur de cogénération, ni de géothermie. En plus la hausse des prix stimulera outre les travaux d'isolation et le changement de chaudières, l'équipement avec chauffe-eau solaires ou l'achat de chauffages électriques à accumulation²⁸.

Dans des locaux déjà équipés d'un chauffage central au gaz ou au fioul, l'électricité sera utilisée comme énergie de base et l'énergie de pointe sera le gaz ou le fioul. Ceci évitera de devoir importer de l'électricité chère et polluante en hiver pendant les pics de consommation. La part de l'électricité effaçable pour le chauffage dans le secteur résidentiel et tertiaire (scénario 2) représente 17%.

Syrota

Le scénario Markal conduit à des réductions supérieures au scénario Med-Pro, alors que les niveaux de consommation finale sont à peu près équivalents.

A l'inverse du secteur des transports, c'est le scénario Markal qui présente les hypothèses les plus volontaristes (voir le tableau ci-dessous) avec un effort massif d'isolation de 75 % du parc ancien et la généralisation des pompes à chaleur (PAC). L'usage de l'électricité augmente de 15 Mtep entre 2030 et 2050 du fait de la croissance soutenue des usages spécifiques et des PAC, tandis que celui du gaz baisse d'autant.

Les mêmes tendances, pour l'électricité et le gaz, sont observées dans MedProPOLES avec

²⁸ Les avantages liés au recours au chauffage à accumulation sont sujets à caution. En effet, tout d'abord, ces chauffages ne sont utiles que dans des circonstances très précises, mais surtout ils ne permettront pas de diminuer les consommations. Ils ne feront que décaler la consommation d'électricité vers la nuit en dehors des pics de consommation.

néanmoins un usage plus important de la biomasse (9 Mtep contre 5 Mtep) en substitution à une partie de l'électricité.

Pour les deux scénarios, les hypothèses sectorielles ont été basées sur des estimations des gisements de réduction des émissions de CO2 (voir tableaux ci-dessus). Notamment l'isolation offre des gisements d'économies d'énergies importants à un coût très compétitif – ce qui justifie sa place prépondérante dans le scénario MARKAL.

Tableau 34 : Emissions et énergie finale - Syrota

		2001	2020	2030	2050	Facteur de réduction par rapport à 2000
Energie Finale (Mtep)	MARKAL	70,6	65,1		55,7	1,2
	Med-Pro	70,6	63,3		52,4	1,3
Emissions hors élec (MtCO2)	MARKAL	102	70	39	28	3,1
	Med-Pro	102	69	59	41	2,4

Note : Ces chiffres doivent être considérés avec prudence : ceux relatifs aux émissions de CO2 n'incluent pas les émissions du fait des consommations d'électricité par le secteur résidentiel/tertiaire.

Tableau 35 : Hypothèses Résidentiel-tertiaire - Syrota

Hypothèses sectorielles : Résidentiel-tertiaire	MedPro-POLES	MARKAL
Performances dans le neuf	Baisse de besoin de chauffage : -0,8%/an	Règlementation thermique : -15% tous les 5 ans
Isolation des bâtiments anciens : part du potentiel réalisé	Baisse de besoin de chauffage : -0,8%/an	75% (hypothèse facteur 2)
Taux de renouvellement des bâtiments	50000/an	1000000/an
Électricité spécifique	+0,5%/an	+1,4%/an
Hypothèse technique : pompes à chaleur		Possibilité de poursuite de la croissance tendancielle de la dernière décennie (7M en 2050)

Figure 9 : Gisements théoriques d'économies d'énergie dans l'habitat existant

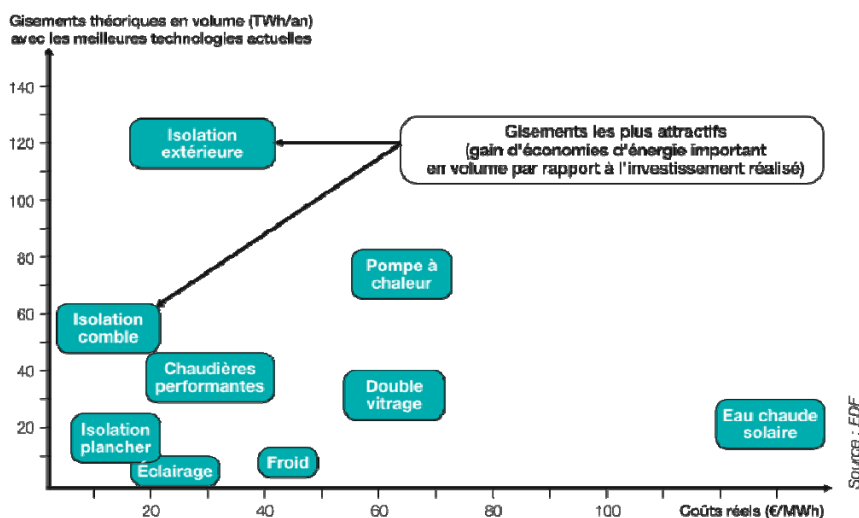


Tableau 36 : Estimation des gisements de réduction des émissions de CO2 dans le résidentiel-tertiaire

Objectifs d'amélioration	Mesures	Exemples	Gain/an à 2030
Processus	Renouvellement	Résidentiel : démolition de 100000 logements contre 50000 remplacés par du neuf	7 MtCO2
Composants	Isolation	Tertiaire : isolation renforcée du bâti ferait gagner 18 TWh de fioul et 28 TWh de gaz	12 MtCO2
	Chaufferies	Tertiaire : rénovation des chaufferies tertiaires (+15% de rendement et basculement au gaz)	6 MtCO2
		Tertiaire : 30% de parts de pompes à chaleur sur les chaufferies gaz ou électriques	4 MtCO2
Systèmes	Bâtiment à énergie positive		

Source : Commission énergie

Analyse comparative

Le scénario le plus ambitieux en termes de réductions d'émissions dans les secteurs résidentiels et tertiaire est le scénario Enerdata (Tableau 35). Il met l'accent sur un programme ambitieux pour les constructions neuves et les rénovations thermiques de l'habitat, mais aussi pour la diffusion des réseaux de chaleur et des chauffe-eau solaires. Ceci s'accompagne d'un fort niveau de pénétration de l'électricité.

Les niveaux de gains en efficacité énergétique sont à peu près équivalents dans les deux scénarios Enerdata et négaWatt. Ce sont les deux scénarios qui vont le plus loin dans le domaine (Figure 9). A l'autre extrême, le scénario MIES F4-H2 ne permet pas d'aller beaucoup plus loin qu'une stabilisation²⁹ des émissions.

Dans tous les cas, c'est la décarbonisation de l'énergie finale qui joue un rôle prépondérant par rapport à la baisse du contenu carbone de l'énergie finale. Ceci est dans la plupart des cas dû à la pénétration de l'électricité dans le secteur avec le 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%). Nous reviendrons sur la part du nucléaire dans le mix énergétique de Markal dans la partie consacrée à l'électricité. Les scénarios nW et nTep se distinguent par 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.

²⁹ Ce qui est surprenant, c'est qu'aucun des scénarios MIES ne se place dans la perspective d'une décroissance marquée de la consommation finale par habitant. Ceci ne ressort pas réellement dans le rapport. Comme il est impossible d'avoir accès aux hypothèses, il est difficile d'en savoir plus.

Tableau 37: Habitat – Facteur de réduction des émissions

	HABITAT- émissions en 2050	FACTEUR /2000
2000 MtCO2	121	
ENERDATA	15	8,1
nW	21,8	5,6
MIES - F4 H2	25,7	4,7
MARKAL	28	3,1
nT	31,6	3,8
MIES - F4 Nuke	42,2	2,9
Prévot - 2030	42,5	2,8
MIES - F4 RConN	49,4	2,5
MEDPRO	53,0	2,4
MIES - F4 Séquest	64,5	1,9
MIES - F4 sN+S	114,7	1,1

Figure 9 : Analyse secteur Résidentiel et tertiaire

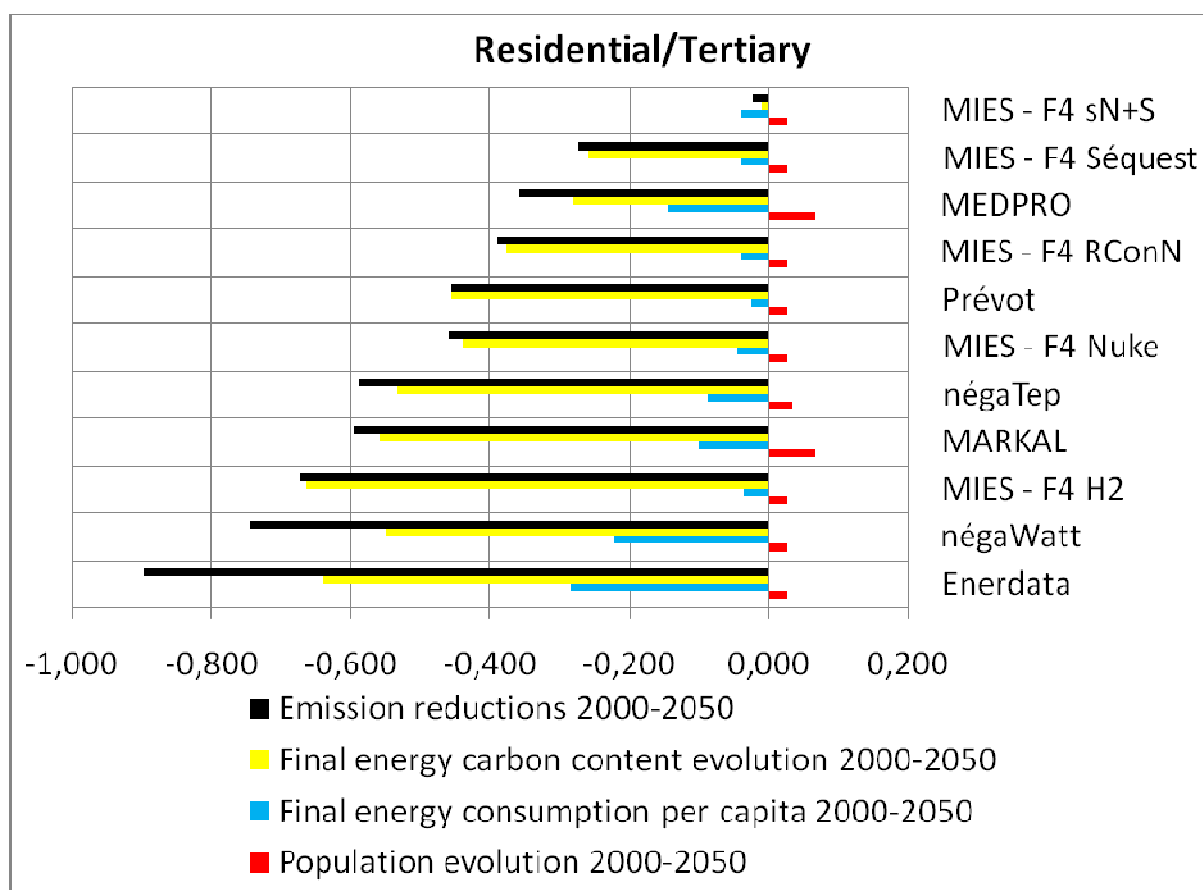
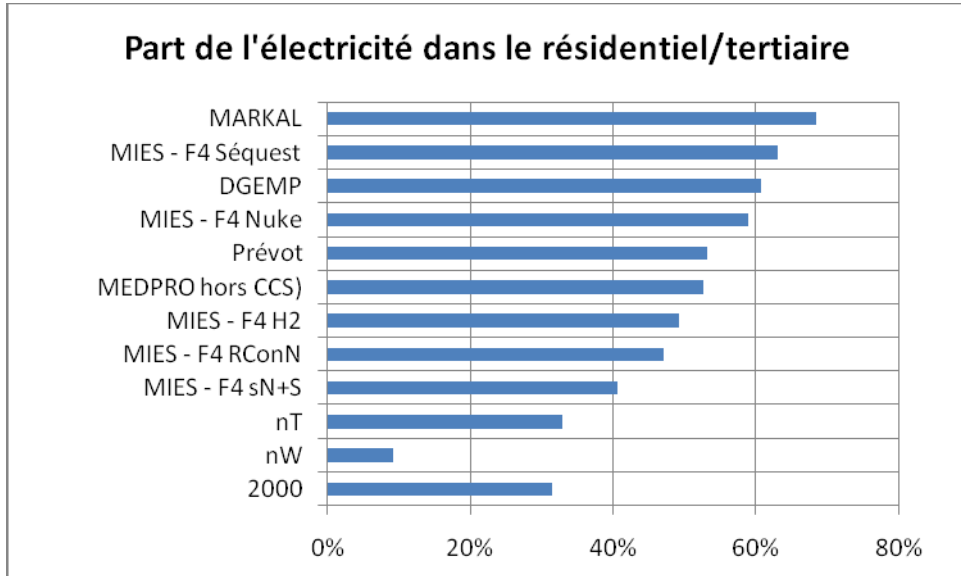


Figure 10 : Part de l'électricité d'origine non renouvelable dans l'énergie finale consommée dans le secteur résidentiel/tertiaire



4.4. Industrie

Les consommations du secteur industriel représentaient 40,9Mtep en 2000, dont 28Mtep pour les usages thermiques (dont 27Mtep de fossiles) et de 150TWh (12,9Mtep) d'électricité (processus industriels mais aussi usages spécifiques et chauffage). Il est à noter que l'industrie a déjà significativement réduit ses émissions par le passé et amélioré son efficacité énergétique globale.

NégaWatt

La chaleur utilisée dans l'industrie baisse de 0,3TWh/an, conduisant à un potentiel **d'économie d'énergie de 110TWh**. La chaleur est fournie par le solaire thermique et des réseaux de chaleur. Les combustibles sont issus de la biomasse et de combustibles fossiles (produits pétroliers, gaz naturel et charbon). Le secteur industrie / agriculture consommerait en 2050 392 TWh. Ce secteur est ainsi celui avec la réduction de la consommation énergie finale la moins importante : -20% par rapport à 2000.

NégaTep

Le scénario tendanciel prolonge l'accroissement de +0,8% par an du secteur industriel ; ceci conduirait en 2050 à 39Mtep et 210 TWh d'électricité (soit 57Mtep). Le scénario négaTep prévoit une forte diminution de la consommation de chaleur directe à 16 Mtep dont 6Mtep de renouvelables, soit une réduction de 12Mtep par rapport à 2000 (-57%). En revanche, **la part de l'électricité augmenterait à 240 TWh (+160%)**. La consommation d'énergie finale (chaleur et électricité) est de 36,7 Mtep. La réduction de 10,5% de la consommation d'énergie (entre 2000 et 2050 sur la totalité de l'énergie finale consommée par le secteur industriel) est réalisée par l'amélioration de l'efficacité énergétique.

MIES

Les différentes variantes s'appuient sur un cadrage de l'évolution du secteur industriel: i) **croissance de l'activité industrielle** de 1,2% par an considérant une tertiarisation de l'économie et une activité sidérurgique stable, ii) **pas de délocalisations supplémentaires**, iii) **pas de chute rapide des consommations** des industries grandes consommatrices d'énergie, iv) orientation de l'activité industrielle vers une **production localisée** près des centres de consommation de biens manufacturiers à haute valeur ajoutée.

L'augmentation de l'activité industrielle de 82% en 2050 devrait conduire à une augmentation d'énergie de 58%. Dans le scénario tendanciel « sans Eco » les consommations augmentent significativement (60,2 Mtep) en 2050.

Les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique permettent de retrouver une **consommation 2050 de seulement 30% supérieure à celle de 2000**. Dans les différentes variantes F4, la consommation du secteur industriel varie en 2050 entre 49Mtep dans « F4

Séquest» et 51Mtep dans « F4-H2 ». Les mesures considérées sont l'amélioration des procédés et des équipements, un développement du recyclage pour réduire les consommations d'énergie thermique dans la phase de transformation des matières premières et enfin un développement des procédés électriques en lieu et place des procédés thermiques.

La **part des ENR hors hydro reste très basse** avec un maximum de 5,6 Mtep pour la variante « Turbine à gaz » (11,2% de la consommation d'énergie finale). Cette variante met également en avant les potentiels en termes de cogénération. Il y a deux variantes qui utilisent de l'hydrogène « F4 RCogN » et « F4 hydrogène ». Enfin, la part de l'électricité varie entre 22Mtep dans « F4 sN+S » et 32Mtep (64%) dans « F4 nucléaire ».

ENERDATA

Les émissions de CO2 de l'industrie baissent d'un facteur 2,2 par rapport à 2000. La **demande énergétique connaît un pic en 2020**, puis décroît pour atteindre 33,4Mtep en 2050 et une division par 1,5 par rapport à 2000.

Tableau 38 : Secteur industrie - Enerdata

Industrie, dont:	50	61	52	33,4
Pétrole	21	26	19	6,3
Gaz	14	18	17	10
Charbon	4	5	3	0,5
Électricité	11	12	14	16,6
Renouvelables & Chaleur	0	0	0	0

Les projections reposent sur les hypothèses suivantes :

- Croissance industrielle réduite de moitié après 2030, réduction homogène sur toutes les branches,
- Exploitation systématique de tous les potentiels techniques d'efficacité énergétique basée sur les estimations du CEREN - Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie (1992) ; alignement sur les meilleures pratiques pour la sidérurgie,
- Maintien de la sidérurgie, baisse de moitié du raffinage et des vapocraqueurs, poursuite du déclin de l'ammoniac et du chlore ; progression faible du papier après 2030.

Une forte **substitution vers l'électricité** (de 20% en 2000 à 50% en 2050) limiterait le recours aux énergies fossiles. Par contre **la part des ENR serait nulle**.

Les auteurs estiment en revanche que les hypothèses d'efficacité énergétique qui ont été retenues sont conservatives et reflètent plus le techniquement possible aux prix courants de l'énergie, que l'éventail des solutions technologiques alternatives. Par exemple le possible remplacement des haut-fourneaux de Fos et Dunkerque par des procédés nouveaux à base d'électrolyse ou de réduction directe du minerai par l'hydrogène permettrait d'économiser 3 Mtep de coke et 12 Mt CO2 supplémentaires en 2050 (soit 30% des émissions de CO2 de 2050).

Prévoit

Les consommations d'énergie finale de l'industrie restent stables jusqu'en 2030, mais les émissions diminuent pour atteindre 14 MtC en 2030 (selon le scénario 1) du fait du recul du charbon et des produits pétroliers et d'une substitution vers l'électricité, la biomasse et l'apparition du biogaz.

Syrota

Les hypothèses de croissance tendancielle de la production de + 2 % par an dans MARKAL et de + 1,5 % par an dans MedPro-POLES ont été retenues (basées sur des analyses d'une dizaine de secteurs industriels). Le gain en efficacité énergétique correspond à 0,45% par an pour les deux scénarios. Malgré cette croissance soutenue, le scénario Medpro-Poles aboutit à un facteur 6 de réduction des émissions en diminuant sa consommation énergétique de 50%. Les deux modèles se distinguent sur le contenu de la croissance, MARKAL maintenant une croissance de la production industrielle et MedPro-POLES présentant un effet de tertiarisation.

Tableau 39 : Industrie et Agriculture - Syrota

		2010	2020	2030	2050	Facteur de réduction par rapport à 2000
Energie Finale (Mtep) Industrie	MARKAL	37,8 (2006)	44,8		49	0,7
	Med-Pro	37,8 (2006)	27,3	30,4	21	1,7
Emissions Industrie (MtCO2)	MARKAL	102 (2006)	76	78	53	1,9
	Med-Pro	102 (2006)	39	33	17	6

Tableau 40 : Hypothèses industrie - Syrota

Hypothèses sectorielles : Industrie	MedPro-POLES	MARKAL
Croissance de la production	1,5%/an	2%/an
Efficacité énergétique	0,45%an	

Analyse comparative

C'est dans ce secteur que les résultats sont les plus contrastés au travers des scénarios, entre le scénario MIES F4-sN+S qui prévoit **une augmentation des émissions du secteur de 30% et le scénario Syrota-MedProPOLES avec une division par 6 (-84%)**. Il apparaît également que **les scénarios avec séquestration** (MIES F4 sN+S, MIES F4 Séquest) permettent de relâcher toute contrainte carbone sur le secteur industriel.

Ces écarts se reflètent à la fois sur l'évolution du contenu carbone de l'énergie finale et sur l'évolution de la consommation d'énergie finale par habitant.

Deux visions sur l'évolution du secteur industriel semblent donc s'opposer : d'un côté Enerdata, négaTep, Med-Pro et nW qui projettent une augmentation de l'efficacité énergétique couplée avec une diminution de la consommation d'énergie finale par habitant, et de l'autre côté : MIES F4 sN+S, MIES F4 Séquest, MIES F4 nuke, MIES F4 H2, MIES F4 RCogN et Markal. Ceci peut résulter de visions différentes quant à l'évolution du secteur industriel : tertiarisation vs maintien des structures actuelles de production.

Ces écarts dans les résultats des projections du secteur industriel peuvent également provenir d'analyses trop parcellaires sur l'évolution du secteur industriel, avec bien souvent des représentations très frustes dans les modèles, voir des estimations de potentiels basés sur des études datées (Enerdata se base sur une étude 1992).

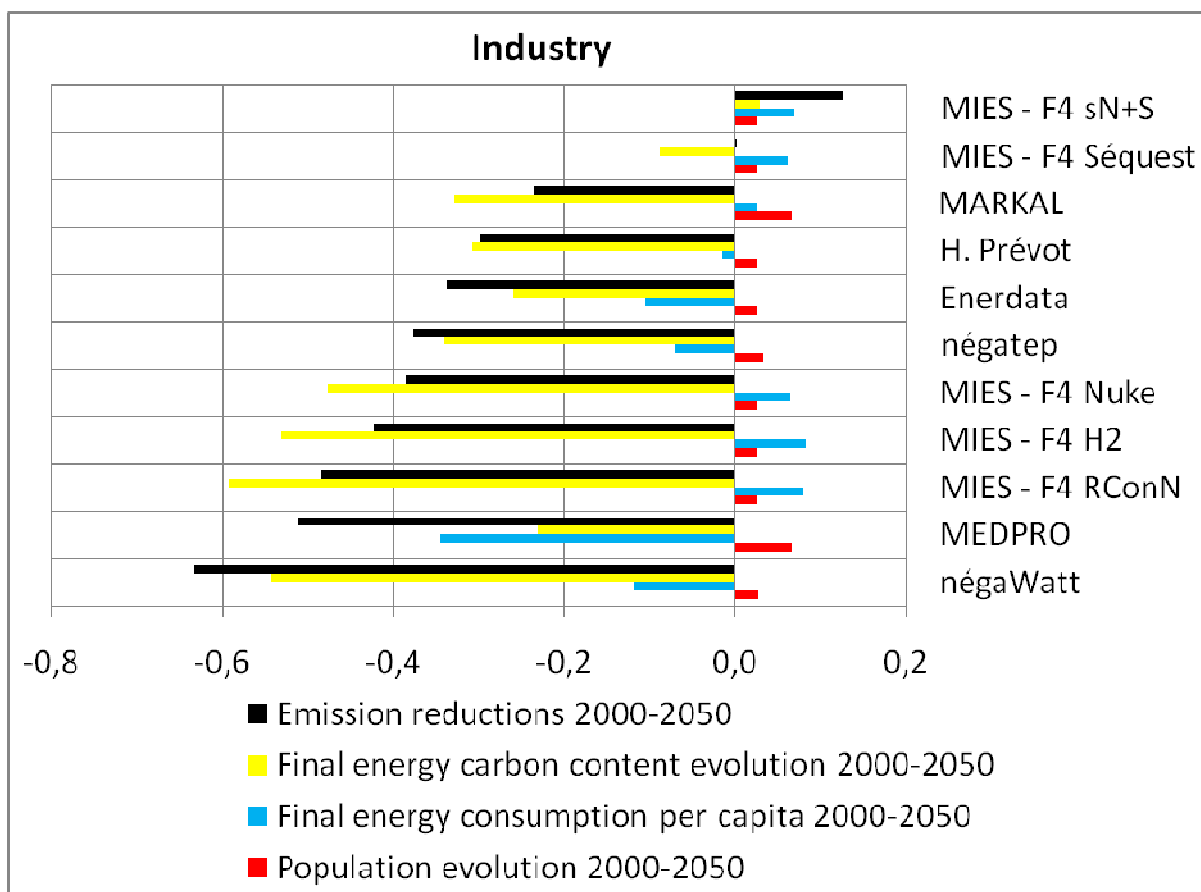
Il est d'autre part difficile de penser l'évolution des activités industrielles françaises sans penser l'évolution de la compétitivité et du commerce internationaux. Ainsi à chaque fois le contexte commercial international doit être décrit.

D'autre part, une dimension qui n'est non seulement jamais prise en compte, mais d'autre part jamais mentionnée dans les exercices de facteur 4 : la possible substitution d'une production nationale par des importations. Dans ce cas, ceci donnerait lieu à des « exportations » de nos émissions qu'il faudrait prendre en compte dans l'évaluation des trajectoires Facteur 4.

Tableau 41: Analyse secteur industrie – Facteur d'émission

	Industrie – émissions en 2050	FACTEUR /2000
2000 MtCO2	100	
MEDPRO	17	6
nW	23,3	4,3
MIES - F4 RConN	32,7	3,1
MIES - F4 H2	37,7	2,7
MIES - F4 Nuke	41	2,4
nT	42	2,4
DGEMP	46	2,2
Prévo - en 2030	50,4	2,0
MARKAL	58	1,7
MIES - F4 Séquest	100	1,0
MIES - F4 sN+S	133,2	0,8

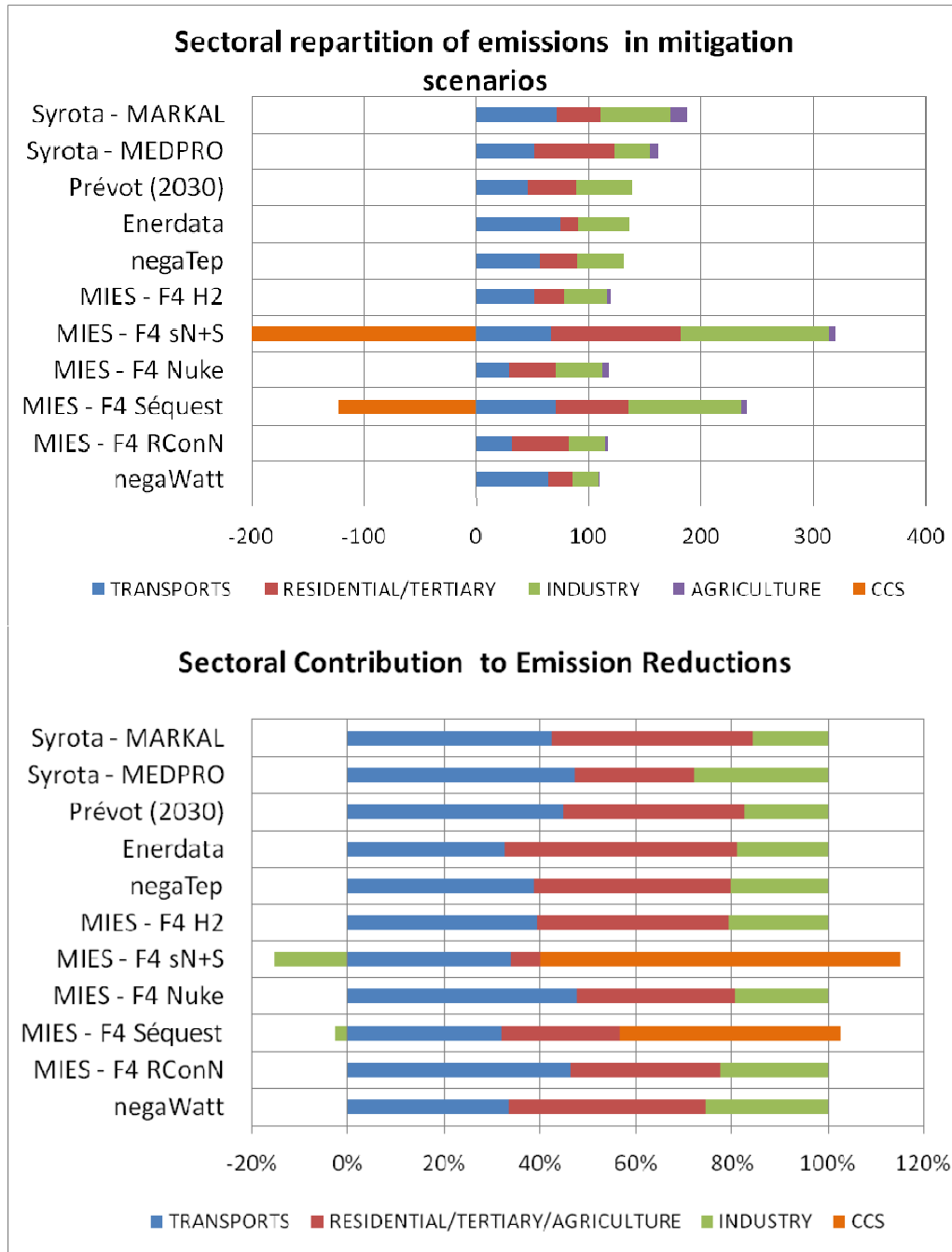
Figure 11 : Analyse secteur industrie



4.5. Bilan sectoriel global

Comme les émissions de CO₂ seul étaient de 390 MtCO₂ en 2000, le seuil du facteur 4 sur ce périmètre signifie 98 MtCO₂ en 2050. Il s'agit donc de réduire les émissions de 293MtCO₂ sur cette période. Les Figure 12 et 13 montrent, au travers des scénarios étudiés ici, les niveaux de contribution de chacun des secteurs en MtCO₂ par rapport à 2000 et en pourcentage par rapport aux réductions totales atteintes dans chacun des scénarios.

Figure 12 et Figure 13: Contribution sectorielle aux réductions d'émissions en MtCO₂ (en haut) et pourcentage par rapport aux réductions totales (en bas)



Certains éléments en émanent :

- C'est le secteur des transports qui contribue le plus aux réductions d'émissions, alors qu'habituellement c'est le secteur considéré comme le plus délicat pour mettre en œuvre des réductions.
- le secteur résidentiel/tertiaire est le second secteur contributeur par contre la variabilité de sa contribution au travers des scénarios est très forte, ce qui peut paraître étonnant, car pour ce qui est du bâtiment, il y a une forte convergence sur les mesures à mettre en œuvre : renforcement des RT et rénovation du parc bâti. Néanmoins, ce qui varie au travers des scénarios c'est soit la part du gisement qui est exploitée (du fait de seuils de réglementations thermiques différents ou d'hypothèses contrastées sur le respect de ces réglementations), soit le déploiement de technologies très efficaces telles que les réseaux de chaleur, la cogénération ou les chauffe-eaux solaires et soit enfin les perspectives de réduction des consommations d'électricité spécifiques.
- le secteur de l'industrie est le dernier secteur contributeur en moyenne avec un écart type à peu près égal à la moyenne de sa contribution. Les incertitudes sont donc très grandes sur le volet industriel.
- il est à noter également que lorsque la CCS est rendue possible dans un scénario, sa contribution de la CCS est prépondérante, permettant ainsi de relâcher la pression exercée par la contrainte carbone sur les autres secteurs. Ces résultats sont à prendre avec prudence. En effet, même si cette technologie devient commercialement exploitable, les barrières à son déploiement à grande échelle sont nombreuses : acceptabilité du public, technologie intensive en capital et donc qui mettra du temps à se déployer, capacités limitées de stockage en France...

Tableau 42 : Niveaux de réductions dans les différents secteurs pour tous les scénarios

	Transports	Résidentiel/ Tertiaire/ Agriculture	Industrie	CCS	Réductions totales
negaWatt	93	113	70	-	276
MIES - F4 RConN	125	84	60	-	269
MIES - F4 Séquest	86	67	-7	123	269
MIES – F4 Nuke	128	88	52	-	268
MIES – F4 sN+S	91	16	-40	200	267
MIES – F4 H2	105	106	55	-	266
negaTep	99	105	51	-	255
Enerdata	82	121	47	-	249
Prévot (2030)	111	94	43	-	247
Syrota – MEDPRO	106	55	62	-	223
Syrota – MARKAL	85	83	31	-	199
Moyenne	101	85	40		
Ecart type	46	105	110		

Le tableau ci-dessus montre les réductions des émissions pour les différents secteurs et

scénarios entre 2000 et 2050 (2030 pour Prévot). Sont surlignées en rouge les réductions les plus faibles et en vert les réductions les plus importantes. Il est intéressant de noter qu'aucun des scénarios n'atteint le niveau de réductions requises (293 MtCO₂).

4.6. Energie

L'évolution du mix énergétique est la résultante des évolutions sectorielles analysées au préalable. En 2000, 450TWh d'électricité ont été produits et consommés en France et 70 TWh ont été produits pour l'exportation. En 2000, le secteur électrique émettait 10,9MtC pour 34 Mtep en énergie finale puisque le nucléaire et l'hydraulique assurent 90% de la production. La production du secteur électrique représentait 120,1 Mtep d'énergie primaire en 2000 – en grand majorité issue du nucléaire.

NégaWatt

La première remarque importante que l'on peut faire sur ce scénario par rapport aux autres scénarios concerne la part de l'électricité dans le mix d'énergie primaire général : en effet, au contraire des autres scénarios, la part de l'électricité dans l'énergie primaire diminue de 47% à 42% - la baisse en chiffres totales est encore plus importante car la production d'électricité diminue de 40%. Nous verrons par la suite, que ceci explique un rendement du secteur énergétique plus important que dans les autres scénarios.

La production d'électricité est quasi totalement décarbonée en 2050 avec une **forte pénétration des ENR** (72% de l'énergie primaire et 85% de la production d'électricité en 2050). En 2050, 427 TWh d'électricité sont produits dont 361 TWh à partir d'ENR avec une grande part de production éolienne (et Tableau 41). L'option retenue pour ce scénario de ne pas renouveler les centrales existantes conduit à une sortie du nucléaire dès 2035. Une transition par le gaz, seule énergie fossile subsistant dans le mix électrique, avec des centrales à cycle combiné au gaz et de la cogénération, est prévue avant que les ENR ne se déploient pleinement.

Dès 2040, les EnR intermittentes (éolien, PV) représentent environ 40 % de la production électrique. L'équilibre offre-demande du réseau est assuré par des centrales gaz à cycle combiné qui sont adaptés au suivi de charge. La question de l'intégration des EnR variables dans le réseau se pose donc de manière très importante. Aujourd'hui, un décret ne permet que contraint à 30% maximum la part des ENR intermittentes sur le réseau³⁰. Un tel scénario nécessite donc la levée de cette contrainte imposée pour des raisons de gestion du réseau par RTE. Dans le scénario négaWatt, l'aspect « gestion du réseau » avec notamment les potentiels liés aux *smart-grid* ou encore aux compteurs intelligents ne sont pas mentionnés.

³⁰ Ce décret mentionne qu'à chaque instant sur le réseau, la part des ENR intermittentes ne doit pas dépasser 30% de la puissance d'appel. Dans le cas contraire, le gestionnaire de réseau se réserve le droit de délester les énergies intermittentes soumises à obligation d'achat. Cette limite est loin d'être atteinte en métropole, mais dans les DOM et notamment à la Réunion, cette part pourrait être atteinte de manière occasionnelle dans moins de 8 ans. Ceci crée une incertitude forte pour les développeurs de projets dans ces technologies.

Tableau 43 : La part des différentes sources d'énergie en TWh - NégaWatt

Production électricité	2000	2020	2050
Renouvelables	76,0	150,0	361,0
Hydraulique	73,0	75,5	79,5
Grande	65,5	65,5	65,5
Petite	7,5	10,0	14,0
Eolienne	0,1	47,2	137,3
terrestre	0,1	30,7	64,6
off-shore	0,0	16,5	72,7
Photovoltaïque	0,0	3,2	65,2
PV maison individuelle	0,0	2,1	29,5
PV sur collectif et infrastructures		1,0	18,8
Centrales solaires		0,1	16,8
Biomasse	2,85	21,6	49,2
Part élec. Cogen Biogaz	0,35		
Part élec Cogen Biomasse	1,5		
Part élec. Cogen Déchets	1	21,6	49,2
<i>Centrales électriques</i>	<i>1,1</i>	<i>3,1</i>	<i>6,1</i>
<i>Electricité cogénérée</i>	<i>6,1</i>	<i>16,6</i>	<i>43,1</i>
Energie de la mer	0,0	0,0	10,1
courants	0,0	0,0	4,8
vagues	0,0	0,0	5,3
Géothermie	0,0	2,0	20,0
Part élec. Cogen Géothermie	0,02	2,0	20,0
Fossiles-Fissiles	396,0	297,0	66,0
Technologies actuelles			
Centrales nucléaires	350,0	209,0	0,0
Centrales gaz naturel	16,4	0,0	0,0
Centrales Charbon	25,3	0,0	0,0
Centrales Fioul	4,5	0,0	0,0
Nouvelles technologies			
Gaz nat Cycle Combiné	0,0	44,0	33,0
Gaz nat Cogen	0,0	44,0	33,0
Micro Cogen gaz naturel	0,0	0,0	0,0
Pile à combustible gaz	0,0	0,0	0,0
Total production intérieure	472	447	427
Surcapacité pour exportation	0	0	0
Part renouvelables / production	16%	33%	85%
Part nucléaire / production	74%	47%	0%

Figure 14 : Répartition détaillée des EnR par source - Négawatt

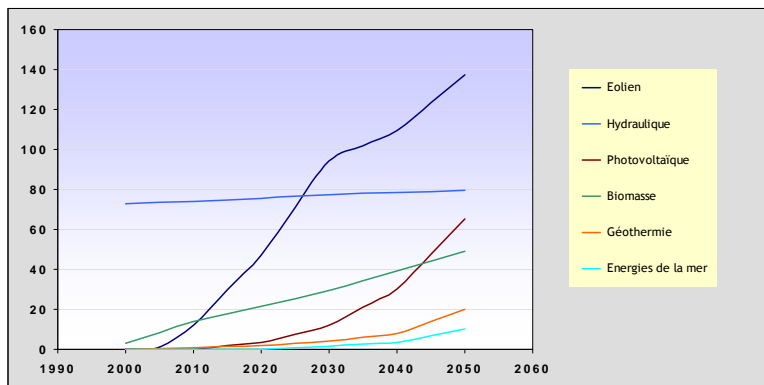


Figure 15 : Répartition selon modularité - Négawatt

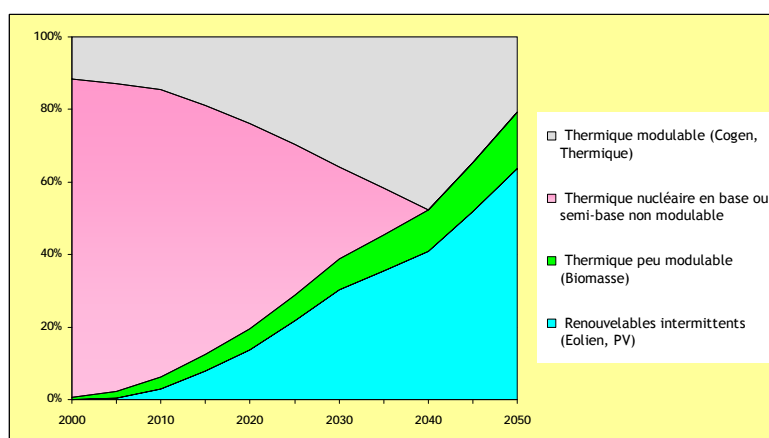


Tableau 44 : Bilan énergie primaire et évolution des sources d'énergie

Bilan Energie primaire (TWh)	2000	2020	2050
Energie primaire par usage			
Électricité	1277	989	510
Chaleur	878	687	455
Mobilité	563	409	241
Total	2718	2085	1206
Sobriété	0	238	547
Efficacité demande	0	327	873
Efficacité offre	30	426	1009
Total	30	991	2429
Energie primaire par source			
Gaz	431	460	167
Charbon	177	66	5
Pétrole	920	602	206
Uranium	1061	633	0
Renouvelables	198	402	958
Total	2787	2163	1336
Sobriété	0	238	547
Efficacité demande	0	327	873
Efficacité offre	30	442	991
Total	30	1007	2411

NégaTep :

La production d'électricité dans le scénario négaTep (725 TWh) dépasse le niveau du scénario tendanciel (675 TWh). Ceci s'explique par la très **forte substitution des énergies fossiles vers une électricité** sobre en carbone à la fois dans le secteur des transports (avec notamment le fort développement des véhicules électriques), dans le secteur de l'habitat avec la plus forte pénétration du chauffage électrique et dans l'industrie (+160%).

Cette augmentation due au recours à l'électricité ne s'accompagne pas d'une mutation profonde du mix énergétique. **La part des ENR progresse néanmoins avec 17%** de l'électricité d'origine renouvelable en 2050 (120TWh). La production d'origine éolienne reste limitée, mais l'électricité d'origine nucléaire augmente fortement (+40%). Ceci pose clairement la question du nucléaire et de son possible rythme de déploiement. L'usage des énergies intermittentes est limité à 20 TWh car selon les auteurs, derrière chaque MW éolien installé il faut 0,7 à 0,9 MW d'une autre source d'appoint pour pallier à l'intermittence. La part des ENR dans l'énergie finale passe néanmoins de 10 à 37%.

Concernant les usages hors électricité la consommation de pétrole sera divisée par 3 et celle de gaz et de charbon par 2.

Tableau 45: Secteur énergie - NégaTep

Situation 2000 (525 TWh)	Scénario négaTep 2050 (725 TWh)
Nucléaire	
400 TWh (76%)	565 TWh (78%)
Energies renouvelables	
(14%)	(17%)
Hydraulique 70 TWh	Hydraulique 70 TWh
Bois et déchets 5 TWh	Bois et déchets 20 TWh
	Eolien 20 TWh
	Autres 10TWh
Sources émettrices de CO2	
Fossiles 50 TWh (9,5%)	Gaz naturel 40 TWh (5,5%)

MIES :

La production de l'électricité varie entre les différentes variantes « F4 sN+S » de 56,6 Mtep (39% de l'énergie finale) et « F4 nucléaire» 80,3 Mtep (57% de l'énergie finale).

Au regard des scénarios développés dans le rapport, l'évolution du secteur électrique ne semble pouvoir présenter que deux évolutions possibles : **option nucléaire vs option ENR**. Les variantes incluant un recours au nucléaire varient entre un maintien de la production d'électricité nucléaire au niveau actuel et une croissance de 70% (variante F4 Nucléaire ou F4 H2). Toutes les variantes en dehors de celle misant sur le seul nucléaire doivent développer les renouvelables à un niveau proche de leur maximum. La part des énergies renouvelables³¹ est la plus élevée dans les variantes « F4 RCogN » avec 58,8 Mtep (31%) et

³¹ Aucun détail n'est donné sur la répartition des différentes énergies renouvelables.

« F4 sN+S » 39,3 Mtep (37%). **Le gaz sert ensuite de bouclage** (entre 15 et 20 Mtep) est nécessaire pour assurer les pointes de consommation et compléter les productions intermittentes.

Le recours à la biomasse pour produire de l'électricité restera limité car elle sera déjà fortement sollicitée pour la production de chaleur pour le bâtiment et pour les agrocarburants

ENERDATA

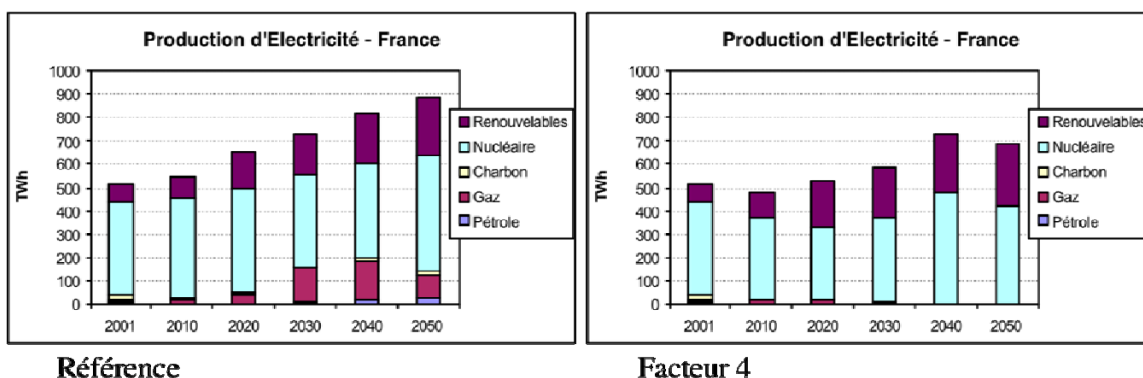
Le scénario ENERDATA montre une **augmentation de la part de l'électricité** (42% en 2050) dans l'énergie finale et dans une moindre mesure des ENR (14% en 2050) ainsi qu'une diminution de la consommation du pétrole et du gaz. L'**hydrogène** se déploie tard et en petite quantité (5,4Mtep en 2050).

Le rendement du système énergétique reste très faible sur toute la période observée du scénario car **le nucléaire avec un rendement particulièrement faible représente une source d'énergie majeure**. La production de l'électricité sera de moins en moins émettrice de GES et en 2050 les uniques sources pour la production d'électricité seront l'uranium et les ENR (électricité et chaleur).

Tableau 46 : Consommation énergie primaire et finale - Enerdata

Consommation Primaire (Mtep)					Différence en % 2000-2050	% dans le total 2000	% dans le total 2050
	2001	2010	2030	2050			
Total, dont:	259	265	245	194	-25%	100,00	100,00
Pétrole	94	106	87	35	-63%	36,29	18,04
Gaz	37	43	34	12	-68%	14,29	6,19
Charbon	12	6	4	1	-92%	4,63	0,52
Nucléaire	100	91	92	109	9%	38,61	56,19
Renouvelables	16	19	27	38	138%	6,18	19,59
Consommation Finale	2001	2010	2030	2050			
Total, dont:	167	192	170	115,6	-31%	100,00	100,00
Pétrole	88	100	81	32,7	-63%	52,69	28,29
Gaz	33	44	35	11,6	-65%	19,76	10,03
Charbon	4	5	3	0,5	-88%	2,40	0,43
Électricité	32	31	36	49,1	53,40%	19,16	42,47
Renouvelables & Chaleur	9	12	14	16,3	81,11%	5,39	14,10
Hydrogène	0	0	0	5,4	540%	0,00	4,67
Rendement du système énergétique	0,64	0,72	0,69	0,60			

Figure 16 : Electricité - Enerdata



Prénot

Entre 2006 et 2030 la **consommation d'électricité** augmente de 80% passant de 37 Mtep à 61 Mtep. Les émissions de la production d'électricité sont de 8,5 MtC en 2000 et de 8,2 MtC en 2030 :

- Les énergies fossiles représentent 25% de la consommation finale en 2000 et 17% en 2030.
- La **consommation de l'électricité d'origine nucléaire est doublée**. Il faudra donc construire trois centrales nucléaires de 1,5 GW par an, retrouvant ainsi le rythme des années 80 pour arriver à une puissance installée de **124GW en 2030**.
- La production d'électricité hydraulique restera stable, une éventuelle production à partir d'éoliennes (seulement 10GW déjà installées ou planifiés), du photovoltaïque ou de la géothermie profonde n'est pas prise en compte. Pour les pompes géothermales et les capteurs solaires pour le chauffage et l'eau chaude le scénario retient 5 Mtep. Les capacités de la cogénération n'ont pas été intégrées dans le scénario. Mais par contre la biomasse joue un rôle important dans le scénario.

La part des énergies renouvelables dans l'électricité en 2030 est seulement (scénario 1) de 11,5%, mais elle est de 38,8% dans l'énergie finale du fait de la contribution importante des agrocarburants. Pour produire les agrocarburants du scénario 2, 163 TWh d'énergie externe dont 20% chaleur seront nécessaires. 33 TWh de chaleur seront ainsi issus de sources énergétiques fossiles avec CCS.

Syrota

Les émissions énergétiques du secteur de l'énergie diminuent d'une manière très inégale entre les deux scénarios : Facteur 3,2 pour Markal contre 1,1 pour MedPro-POLES. La consommation d'énergie finale se stabilise pour Markal et diminue de 33% pour le scénario Medpro-POLES. Markal a d'avantage recours au nucléaire et à la biomasse; MedPro-POLES ayant retenu une contrainte sur le déploiement du nucléaire utilise plus d'énergies fossiles

et d'éolien.

La part des ENR dans le mix primaire est de 15,4 % (Markal) et de 16,2 % (Medpro) en 2050. Le potentiel de production d'électricité à partir de la biomasse dans MARKAL n'a pas été limité car les résultats du modèle doivent être compris comme la possibilité de substitution vers la biomasse non pas pour de l'électricité mais pour des usages décentralisés de chaleur, à même de couvrir les besoins avec un meilleur rendement.

Tableau 47: Emissions et consommation énergétique - Syrota

	CITEPA 2006	Markal 2020	Markal 2030	Markal 2050	Facteur de réduction (/2006)	MedPro-POLES 2020	MedPro-POLES 2030	MedPro-POLES 2050	Facteur de réduction (/2006)
Energie émissions (MtCO2)	69	21	22	21	3,2	95	75	63	1,1
Total émissions (MtCO2)	412	301	265	187	2,2	309 301	243 206	162 102	2,5 4
Total conso. d'énergie (Mtep)	152,4	161,2		152,8	1	135,5		100,5	1,3

NB : les chiffres en italiques pour le scénario MedPro-POLES renvoient au scénario avec CCS

Tableau 48 : Comparaison des mix d'énergie primaire (en Mtep) - Syrota

	Markal 2050	%	MedPro-Poles 2050	%
Charbon	2,9	1	9,5	4,4
Pétrole	16,9	5,7	29,1	13,4
Gaz naturel	57,3	19,3	30,3	14
Elec. Nucléaire primaire	174,7	58,8	117,9	54,4
Hydro	6,6	2,2	35,2	
Eolienne	1,4	0,5		
EnR thermique	28,1	9,5		
EnR biocarburants	9,4	3,2		
Total renouvelables	45,5		35,2	
Total	278	15,4	222	16,2

Source : commission Energie d'après données ENSMP, Enerdata

Tableau 49: Hypothèses pour le secteur de l'énergie - Syrota

Hypothèses	MedPro-POLES	MARKAL
Limitation de la production nucléaire	65 GW (dimension du parc actuel + Flamanville 3)	90 GW (hypothèse non validée par rapport à la capacité des sites actuels)
Part d'énergies renouvelables dans le mix électrique	2010 : 18% 2020 : 22% 2030 : 26% 2050 : 34%	21% en 2010 (
Energies renouvelables	- Forte croissance de l'éolien et du solaire thermique - Faible croissance du solaire photovoltaïque	Respect des potentiels techniques et économiques : - hydro : 28TWh - chaleur biomasse : 10Mtep en 2005 et 30 Mtep en 2050 - éolien terrestre : 5,5Mtep en 2050

Dans le jeu des hypothèses retenues, aucune rupture technologique importante n'est envisagée : la généralisation du CCS, le déploiement à grande échelle de solutions aujourd'hui encore très coûteuses d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, piles à combustibles, etc.), la disponibilité de solutions encore incertaines (hydrogène produit sans émission de carbone, etc.).

Néanmoins, les hypothèses sont contrastées pour ce qui est du traitement du nucléaire dans les deux scénarios :

- Pour le scénario MedPro-Poles il a été estimé que l'ouverture de nombreux sites nucléaires nouveaux était improbable, ce qui a conduit à l'introduction d'un plafond pour la production d'origine nucléaire au niveau actuel augmenté d'une tranche EPR, soit en tout environ 65 GW.
- Le modèle MARKAL a adopté une hypothèse de 90 GW de nucléaire d'ici à 2050, reposant notamment sur une augmentation des puissances unitaires sur les sites actuels.

La part des EnR dans l'électricité est de 20,5% en 2050 pour Markal et 26,5% pour MedPro.

Au-delà, le scénario MARKAL ne conserve que très peu de moyens fossiles pour participer à la **gestion intermittente de la charge** (journalière, saisonnière). À l'inverse, le scénario MedPro-POLES est excessif en moyens fossiles. Cet écart pose la question du niveau nécessaire de la capacité d'ajustement du système qu'il faudrait considérer sur l'horizon prospectif et des moyens à mettre en œuvre pour la couvrir avec le moins d'émissions possibles.

Par ailleurs le niveau important accordé au nucléaire dans ces scénarios se fait au détriment de solutions de production d'énergie décentralisée. Ceci montre une faiblesse inhérente à ces modèles, pour lesquels le nucléaire puisque plus compétitif est choisi à grande échelle. Limiter sa pénétration ne peut se faire que de manière exogène, en tant qu'hypothèse extérieur. Afin de mieux représenter la diversité des solutions potentielles pour répondre à la demande, les modèles mériteraient d'être approfondis en particulier quant au paramétrage de différentes solutions présentant un fort rendement : cogénération, chauffage thermique, etc.

Tableau 50 : Comparaison de la production d'électricité - Syrota

Secteurs	Markal 2050	Medpro-Poles 2050
Nucléaire	732	453
Hydro	73	72
Eolien	16	102
Charbon	0	48
Gaz (CCG)	7	56
Fioul (+TAC)	2	0
Thermique décentralisé non ENR	Agrégé avec thermique classique	
Autres EnR, déchets	103 (biomasse)	27 (biomasse)
Total	933	758

Analyse comparative

Le premier élément d'analyse comparative concerne les niveaux fortement contrastés quant à la production d'électricité. Les scénarios avec sortie du nucléaire sont largement en dessous en termes de niveau de production d'électricité. Ainsi entre le scénario Markal et le scénario MIES F4 sN+S, la production d'électricité varie de 1 à 4 et de 1 à 2,5 avec le scénario nW.

Deuxième élément d'analyse comparative, **la grande majorité des scénarios avec recours au nucléaire** projettent une production d'électricité basée sur une part du nucléaire souvent aux alentours de 80%.

De la même manière, le niveau de pénétration des énergies renouvelables pour produire de l'électricité apparaît fortement contrasté : de près de 360TWh dans le scénario négaWatt dont près de 40% pour le seul éolien (170TWh), à 0 pour le scénario MIES F4 Séques ou quelques dizaines au mieux de TWh pour MIES F4 H2 et MIES F4Nuke.

Ces différences ne relèvent pas uniquement des méthodologies utilisées ou des modèles mais sont bien plus révélatrices de visions du monde réellement contrastées se faisant face, et de croyances préétablies.

Au-delà de ces résultats, se pose la question de la **modélisation des usages saisonniers de l'électricité et de l'optimisation du mix de production** qui en résulte. Ne prenant pas en compte le caractère aléatoire de l'équilibre offre/demande, en particulier du fait des variations climatiques, certains résultats des simulations sous-estiment le recours aux moyens centralisés de production thermique à flamme ou la place des énergies décentralisées, ou encore le potentiel de lissage de la demande d'électricité.

Dans de nombreux exercices, la représentation des sources d'énergie décentralisée (ENR, cogénération, chauffage ENR thermiques) n'est pas assez précise, en particulier pour celles présentant un très bon rendement énergétique. Ceci conduit vers un **report massif des besoins énergétiques vers des solutions centralisées en particulier vers l'électricité nucléaire**, rapidement sélectionnée selon les critères de choix pour son coût de production qui ne prend pas en compte les coûts du stockage des déchets et du risque sanitaire et environnementale.

Il est donc nécessaire de considérer davantage deux variables importantes que sont le niveau de la capacité d'ajustement du système et la diversité des sources à mettre en œuvre.

Figure 17 : Mix énergétique en 2050 – comparaison (en TWh et en %)

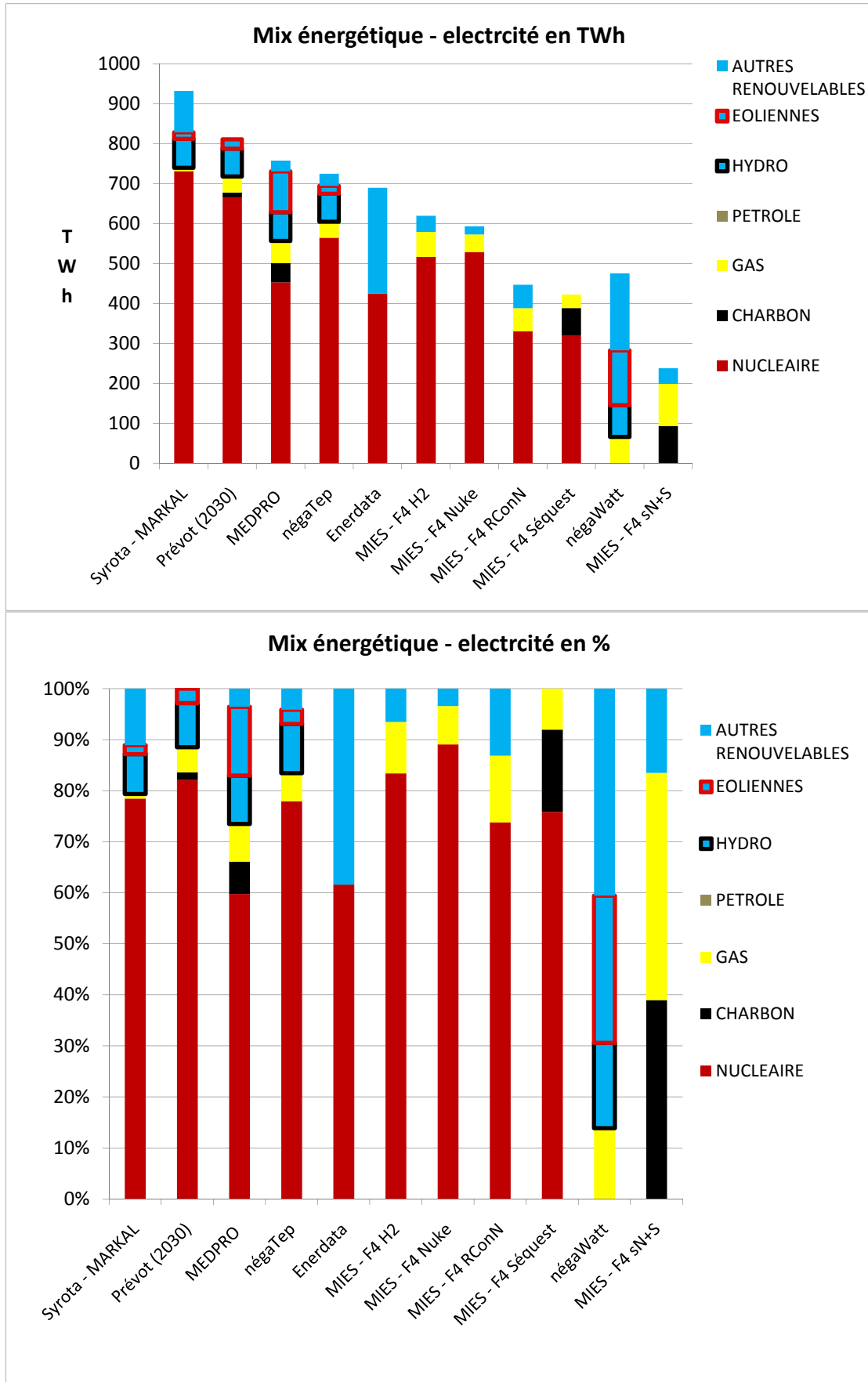
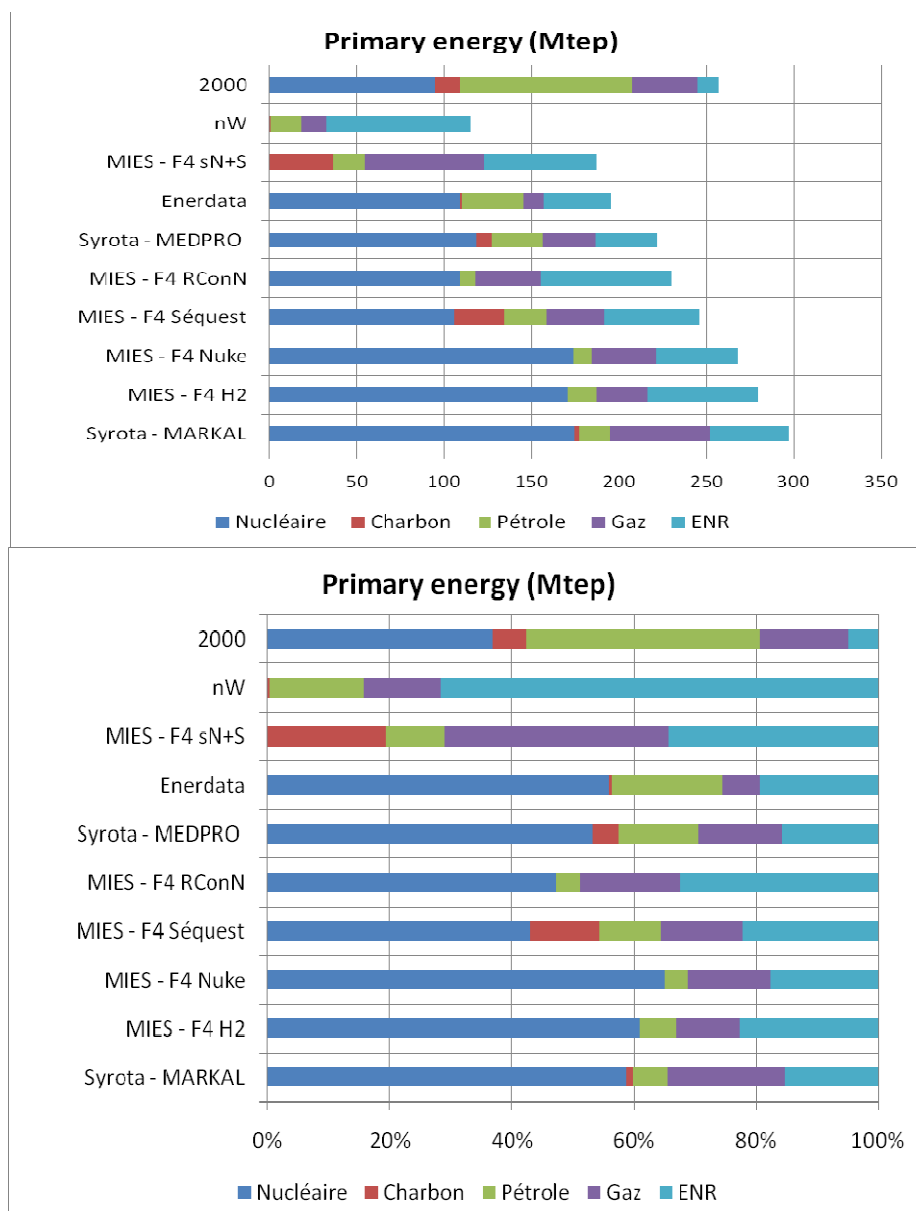


Figure 18 et Figure 19: Répartition du mix énergétique dans l'énergie primaire en volume et en pourcentage



Au niveau du bilan final en énergie primaire, là aussi les résultats sont contrastés.

Les scénarios de réduction des émissions peut se traduire par une hausse de la production d'énergie primaire (Markal, MIES F4-H2 ou MIES F4 Nuke). Néanmoins, dans la majorité des scénarios, la production d'énergie primaire diminue mais pas forcément de manière importante sauf pour nW.

La consommation de **pétrole** diminue par contre fortement. C'est le scénario Enerdata qui projette le plus grand recours au pétrole avec 35 Mtep soit presque déjà un facteur 3 par rapport à 2000 (98Mtep). Tous les autres scénarios sont en dessous, entre 10 et 20Mtep.

Le gaz par contre se déploie grâce aux perspectives de cogénération et grâce à ses niveaux moindres d'émissions de GES. Il apparaît comme une énergie de transition et d'ajustement.

Les ENR contribuent pour des parts contrastées, mais par contre en volume leur contribution apparaît au minimum de l'ordre de 50Mtep, ce qui est loin d'être anecdotique.

Ces projections conduisent par contre pour les scénarios avec nucléaire à une forte pénétration de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique global des scénarios puisque cette part peut augmenter jusqu'à plus de 90%.

Enfin, si l'on veut atteindre du facteur 4 sans séquestration du carbone, il faut complètement **abandonner le charbon**.

4.7. Intensité énergétique et intensité carbone

Enfin nous menons la décomposition de Kaya au niveau du système technico-économique français dans son ensemble.

$$E^{\circ}(2050) = \underbrace{\frac{E^{\circ}(2050)}{Eie(2050)}}_{\text{Intensité carbone}} \cdot \underbrace{\frac{Eie(2050)}{PIB(2050)}}_{\text{Intensité énergétique}} = IC(2050) \cdot IE(2050)$$

$$\log \Delta E^{\circ} = \log \Delta IC + \log \Delta IE$$

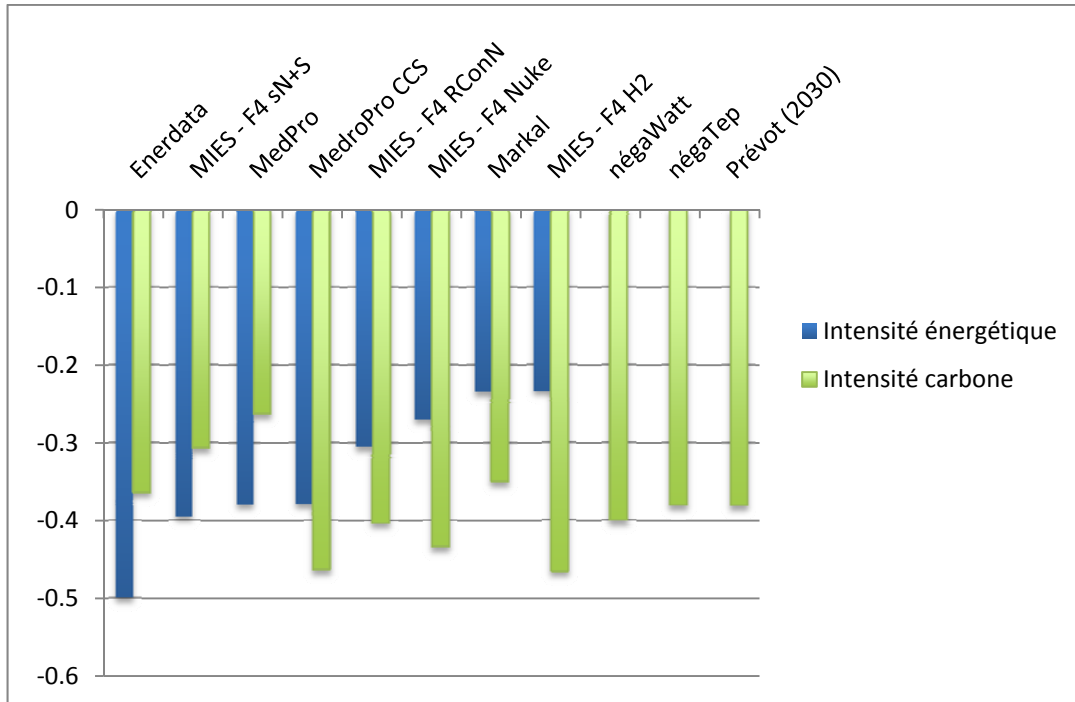
L'intensité énergétique IE désigne le contenu énergétique d'une économie (la quantité d'énergie nécessaire à produire 1 € de croissance). L'intensité énergétique est le rapport de la consommation d'énergie finale et de la production économique (mesurée par le produit intérieur brut). L'intensité carbone IC désigne le contenu carbone de l'énergie finale. L'évolution respective de ces indicateurs est donnée par la Figure 20. Pour les scénarios négaWatt, négaTep et Prévot l'intensité énergétique n'a pu être calculée car il n'y a le PIB de l'économie française ne fait pas partie des variables de scénario. Les résultats sont sans surprise au vu de la description sectorielle qui a été donnée tout au long de ce rapport.

Deux familles de scénarios se forment :

- Une famille avec forte décroissance du contenu carbone de l'énergie : ce sont les scénarios avec forte pénétration d'une technologie non carbonée, soit le CCS, soit le nucléaire, soit l'hydrogène. Dans ces scénarios, la technologie peut apparaître comme salvatrice. Le défi de l'atteinte du facteur 4 se réduit à assurer la pénétration d'une technologie permettant de faire baisser le contenu en carbone de l'énergie utilisée sans forcément mettre en question le niveau des consommations énergétiques.
- Une famille avec forte décroissance de l'intensité énergétique (diminution entre 40% et 50%). Ces niveaux de réductions sont très importants au regard des tendances depuis 30 ans. Ils impliquent en effet une diminution annuelle de l'intensité énergétique entre 1 et 1,4%, niveaux qui ont été rendus possibles avec la restructuration de l'économie française vers des activités moins consommatrices d'énergie durant les dernières décennies du 20^{ème} siècle. Aujourd'hui, avec le niveau déjà important du secteur tertiaire dans l'économie française, la diminution de l'intensité énergétique ne pourra plus être due à une évolution de la structure même de l'économie. Il s'agit bien de diminuer la quantité d'énergie utilisée pour rendre un même service et donc de s'interroger sur la pénétration de technologies plus efficaces au niveau de l'offre bien sûr, mais aussi et surtout au niveau de la demande.

C'est cette dimension que nous allons discuter plus avant dans la suite du rapport.

Figure 20 : Evolution de l'intensité énergétique et de l'intensité carbone entre 2000 et 2050.



PARTIE II - FEUILLE DE ROUTE POUR LA SCENARISATION ENCiLOWCARB

1. Présentation du projet ENCI LowCarb

Le projet ENCI-LowCarb³² (European Network engaging Civil Society in Low Carbon Scenarios) est un projet Européen financé par le 7ème programme cadre de recherche de la Commission Européenne.

Le projet vise la création d'un réseau Européen constitué d'équipes nationales composées d'OSC (Organisations de la Société Civile) et de laboratoires de recherche travaillant ensemble sur la question des scénarios sobres en carbone. A l'heure actuelle, la France et l'Allemagne participent à ce réseau. Les OSC sont le Réseau Action Climat-France (www.rac-f.org), coordinateur du projet, Germanwatch (www.germanwatch.org/) en Allemagne et Inforse EU (www.inforse.org/) au Danemark. Les centres de recherche sont le Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED, www.centre-cired.fr) pour la France et le Postdam Institut für Klimate (PIK, <http://www.pik-potsdam.de/>) pour l'Allemagne.

L'objectif central du projet est l'élaboration de scénarios technico-économiques sobres en carbone pour l'Allemagne d'un côté et la France de l'autre avec un objectif de réduction des émissions de GES en 2050 suffisamment ambitieux pour éviter une augmentation de température mondiale au delà de 2°C.

Dans la suite de cette partie, nous nous appuyons sur la première partie d'analyse des scénarios existants pour la France de manière à faire émerger des propositions méthodologiques et des hypothèses pour la construction des scénarios Facteur 4 dans le cadre du projet EnciLowCarb.

Les points abordés sont :

- Quelle évaluation économique ?
- La modélisation comme outil de construction de l'acceptabilité sociale
- Au-delà des visions purement technologiques, mieux prendre en compte et représenter la sobriété énergétique et l'efficacité énergétique
- Trajectoires permettant de respecter réellement le 2°C

2. Quelle évaluation économique des scénarios facteur 4 ?

2.1. Des analyses économique frustes

L'évaluation économique d'un scénario de réduction des émissions de GES permet de dépasser l'analyse purement technologique ou la faisabilité purement technique de l'objectif

³² Plus d'information sous : <http://www.lowcarbon-societies.eu/>

de facteur 4. L'évaluation peut avoir deux objectifs :

- la représentation et l'évaluation coût/efficacité de différents panels de politiques spécifiques conduisant aux réductions d'émissions : les outils économiques (taxes, tarifs d'achats, subventions) ou réglementaires (normes) à disposition du législateur n'ont pas tous la même efficacité au regard du même objectif ;
- une évaluation économique de l'impact de ces panels de politiques sur l'économie dans son ensemble (croissance, répartition des fruits de la croissance). Une augmentation du coût du service énergétique par l'imposition d'une taxe carbone pourra par exemple avoir un impact néfaste sur l'industrie automobile et sur les ménages financièrement défavorisés. Les bouleversements du secteur énergétique dans son ensemble et les restructurations intra ou intersectorielles auront également des effets positifs et négatifs sur le secteur de l'emploi – qui pourront être mesurés par une telle analyse.³³

La majorité des scénarios analysés se concentre sur une analyse de la faisabilité technique des choix énergétiques et se fonde sur des modèles *bottom-up* qui ne conduisent pas d'analyses macro-économiques (négaWatt, négaTep, Prévot, MIES, Enerdata). Aucun ne prend en compte les rétroactions des politiques climatiques sur le niveau de croissance par exemple.

Tableau 51 : prise en compte des rétroactions économiques des politiques climatiques dans les différents scénarios

	Rétroactions des politiques climatiques sur				
	Prix de l'énergie	Prix du carbone	Rétroactions demande	PIB	Emploi
nW	NON	NON	OUI	NON	NON
nTep	NON	NON	NON	NON	NON
MIES	DISCUSSION	DISCUSSION		NON	NON
ENERDATA	OUI	OUI	BOUCLAGE VLEEM	NON	NON
Prévot	NON	DISCUSSION		NON	NON
Syrot - MedPro- POLES	OUI/NON	OUI	OUI	NON	NON
Syrot - Markal	NON	OUI		NON	NON
Scénario Imaclim	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

³³ Quirion, Philippe (2009),- 30% de CO₂ = + 684 000 emplois L'équation gagnante pour la France : L'étude pilotée par le WWF-France évalue les créations et les destructions d'emploi relatives à une stratégie axée sur la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, permettant de réduire les émissions françaises de CO₂ de 30% en 2020. /Réseau Sortir du nucléaire, Les 7 vents du Cotentin (2006) : « Un courant alternatif pour le Grand Ouest - Etude sur les alternatives au réacteur EPR » : Avec 3 milliards d'euros, au lieu de construire un EPR, on pourrait pourvoir aux mêmes besoins énergétiques, développer des sources d'énergie locales, respectueuses de l'environnement, et créer des emplois au moins 15 fois plus nombreux et mieux répartis sur l'ensemble du territoire.

Seuls les deux scénarios Syrota-Markal et MedPro Poles introduisent une valeur de carbone qui s'ajoute au prix de l'énergie. Le modèle MARKAL rencontre assez vite ses limitations car pour un facteur 4 en 2050 le coût d'une tonne de CO2 grimpe à 30000€ puisque le modèle minimise un coût technologique à demandes fixées. La flexibilité ne se fait qu'au niveau de l'offre.

NégaWatt

Le scénario négaWatt ne s'appuie pas sur un taux de croissance « à priori » du PIB ou de projections de taux d'activités sectoriels. Les auteurs du scénario postulent que l'indicateur PIB va souvent à l'encontre du concept de sobriété mis en avant par le scénario négaWatt : les exemples abondent de création de « richesses » augmentant inutilement la consommation d'énergie sans augmentation du bien-être. Ce bien être ne peut être mesuré par le PIB. Fixer donc « à priori » un ou plusieurs taux de croissance sans réel débat sur la nature du contenu de cette croissance leur semble réducteur. Par contre, là où le scénario négaWatt est intéressant, c'est sur la réflexion et représentation concernant l'évolution des demandes en termes d'usages et de services énergétiques (notion de besoins fondamentaux...)

MIES :

L'impact économique des scénarios se résume à une discussion sur trois paramètres basés sur des calculs simples :

- l'évolution du prix des énergies (la demande se ralentira du fait de la hausse des prix des hydrocarbures ce qui tirera en retour le prix à la baisse) ;
- la valeur du carbone (fiscalité, marchés des certificats d'émission) qui s'ajoutera aux prix actuels ;
- l'évolution de l'intensité énergétique du PIB.

Les dépenses énergétiques hors taxes des différentes variantes ont été calculées en multipliant les prix moyens des énergies de chaque catégorie d'usage par les quantités d'énergie finale de chaque usage. La dépense énergétique a été de 79,8 milliards d'euros en 2000 – elle serait de 144,4 Md€ dans la variante « Sans Eco » (555€ par tep) et de 67,4 Md€ pour la variante « F4 RCogN » (480€) qui a une consommation finale de 140Mtep.

L'économie réalisée (les coûts évités) pourra être utilisée pour financer des actions de maîtrise d'énergie. Cette économie de 75Md€ entre les deux variantes se traduit par une valeur de 675€/tC. Si on admet une dépense constante de l'énergie dans le BIP, un PIB en hausse de 130% donnerait une dépense énergétique proportionnelle de 183,5Md€/an. Le chute de la consommation d'énergie finale de la variante « F4 RCogN » se traduira dans un moindre dépense de 116,1 Md€. Ceci représente une valeur acceptable de 1018€/tC (277€/tCO2). Ce calcul a été effectué à prix constants au niveau de l'année 2000.

Si une hausse de prix d'énergie est anticipée (doublement du prix de pétrole et du gaz vers le niveau de 28 à 56\$/bl et une hausse des prix de l'électricité, du charbon et des renouvelables de 20% - en prix constantes) l'avantage économique de la variante « F4 » se réduit mais reste largement favorable au scénario tendanciel.

La conclusion est claire : **plus l'économie devient indépendante en énergies fossiles plus elle sera insensible aux hausses du prix du pétrole.** En plus une réflexion sur la rente issue de l'augmentation de l'efficacité énergétique est menée. La rente pourra financer l'investissement dans les technologies d'efficacité énergétique et même répondre à des demandes sociales pour atténuer la hausse des prix des énergies.

Prévoit

Dans le chapitre « Le coût de cette diminution des émissions de gaz carbonique » du livre « Trop de pétrole » Henri Prévot développe l'hypothèse des investissements prioritaires basés sur une analyse des **coûts des gaz carboniques fossiles évités**. Ce coût correspond au coût de l'action permettant de diminuer les émissions pour le même service rendu. Pour des prix d'énergie fixés exprimés en monnaie constante sa conclusion est qu'il est inutile de faire des actions dont le coût du carbone est supérieur à 400€/tC. Par exemple il sera donc économiquement préférable de continuer à chauffer des anciens bâtiments que de dépenser beaucoup d'argent pour des travaux d'isolation.

La dépense supplémentaire pour réduire les émissions en 2030 correspondrait donc à 30 Milliards d'euros (1-1,5% du PIB en 2030) – en sachant qu'une baisse (resp. augmentation) du prix de pétrole en augmentera (resp. diminuera) le coût.

Syrota

Le scénario MedPro Poles analyse deux différentes situations marquées par des prix d'énergie fossiles différentes. La différence entre les prix exogènes de l'énergie (donnés par la Commission énergie) et endogènes (sorties du modèle MedPro) montrent un impact des prix élevés sur la consommation d'énergie finale.

Par rapport aux prix endogènes du modèle, les **prix de l'énergie** de la commission Énergie conduisent en 2020 à une baisse de la consommation de 7 % (- 10,6 Mtep), un recul des consommations de pétrole de 17 %, du gaz de 12 % et un recours supplémentaire de 3 % à l'électricité. Les émissions de CO2 baissent de 8 % (et de 12 % hors secteur de l'énergie) ; en 2050, une baisse de la consommation de 4 % (- 3,7 Mtep), un recul du pétrole de 11 %, une progression du gaz de + 2 % et une stabilité de l'électricité. Les émissions de CO2 baissent de 7 % (et de 5 % hors secteur de l'énergie).

Les deux modèles calculent un **coût marginal de la tonne de CO2**.

Dans MedPro-POLES, la prise en compte des objectifs de réduction des gaz à effet de serre

s'effectue par l'introduction d'une valeur du carbone qui s'ajoute au prix de l'énergie. Cette **valeur carbone** affecte :

- la demande d'énergie par le jeu des fonctions élasticité-prix ;
- les choix techniques (technologies « très basses émissions » ou TBE, mix électrique).

Le modèle MARKAL calcule un « **coût marginal de la tonne de CO2 évitée** » qui traduit l'effort à fournir pour atteindre la contrainte de réduction des émissions imposée comme objectif. Il s'agit d'un coût marginal de la tonne de CO2 évitée à demande constante ; cette valeur est plus élevée que la traditionnelle valeur de la tonne de CO2 évitée (comme dans MedPro-POLES). Lorsque les prix de l'énergie augmentent, le consommateur a en effet tendance à réduire sa consommation (comme dans le modèle MedPro-Poles) alors que le modèle MARKAL ne fait que choisir entre les différentes technologies prises en compte par la simulation.

Dans le cas d'une contrainte facteur 4 est appliquée aux émissions de CO2 en 2050, ce coût atteint près de 30 000 €/tC en 2050 (pour Markal). Cette valeur irréaliste traduit l'impossibilité pour le modèle de déterminer des solutions viables, économiquement compatibles avec l'ensemble des contraintes et hypothèses qui lui ont été imposées ; le modèle a épuisé toutes les technologies à sa disposition pour réduire les émissions.

Tableau 52: Coût marginal de la tonne CO2 évitée en scénario de référence contraint par une trajectoire facteur 4 – Markal (Syrota)

€/tCO2	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
F4	43	82	490	1317	5094	9916	19700	29600
F3	45	110	455	505	1578	2442	3512	9926
F2	41	103	254	257	228	176	228	449

Source : commission Energie d'après données ENSMP

Le calcul du coût marginal de la tonne de CO2 permet donc :

- dans MARKAL, d'estimer la faisabilité du système énergétique identifié par l'optimisation ;
- dans MedPro-POLES, de corriger la demande utile, la valeur carbone représentant l'effort supplémentaire à fournir pour atteindre l'objectif visé de réduction des émissions.

Les « valeurs du carbone » obtenues par les deux modèles sont comparées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 53: Valeur du Carbone (€/tCO2)- Syrota

	2020	2050
MARKAL: coût marginal de la tonne de CO2 à demande constante pour un facteur 2	103	449
MARKAL: coût correspondant de la taxe CO2 appliquée aux technologies*	200	
MedPro-POLES: valeur de la tonne CO2	50	230

Source : Commissions Energie d'après données Enerdata

*La taxe permet, dans le cadre de l'approche MARKAL basée sur une optimisation, de modifier l'ordre des technologies, qui

sont choisies dans une hiérarchie coût/efficacité. La taxe pénalise les technologies émissives mais la réorganisation des technologies plafonne à un certain niveau, une fois épuisé le niveau des substitutions intéressantes.

Aucun des scénarios ne représente correctement donc les rétroactions des politiques climatiques sur l'emploi, sur le PIB, sur les demandes en biens et services, sur les investissements... C'est ce que nous proposons de faire dans le cadre des scénarios développés dans le projet EnciLowCarb à l'aide du modèle Imaclim-R.

2.2. Un système énergétique peut-il être indépendant du système économique ?

Les scénarios relatés ici reposent sur des modèles dits *bottom-up* ou sur des analyses de données technologiques. Riches en information technologique, ils utilisent un langage proche de celui de l'ingénieur (expression en quantités physiques des besoins de confort thermique, d'éclairage, de mobilité ou de force motrice). Leur composante économique se réduit à la projection d'un scénario de croissance économique simple (le PIB, sa répartition sectorielle et le revenu des ménages) et à la formulation d'hypothèses sur les coûts des techniques et des énergies fossiles. Ceci pose plusieurs problèmes :

- Tout d'abord, penser ces systèmes techniques indépendamment de leur contexte économique et social manque de réalisme. Certaines projections peuvent par exemple ne correspondre à aucune économie possible du fait de contraintes sur les investissements.

- D'autre part, représenter les trajectoires de croissance sous forme de tendance régulière plus ou moins pentue est loin d'être anodin pour l'évaluation des coûts des politiques climatiques et pour la conduite du débat public. Les modélisateurs du long terme ont l'habitude de fonder leurs simulations sur des hypothèses régulières sans heurt, en argumentant que les fluctuations de court terme n'affectent pas les tendances de long terme ; négligeant les possibles instabilités observées dans la réalité concernant les marchés énergétiques, les déséquilibres extérieurs chroniques ou encore le poids des dettes nationales. Or les chocs possibles sur les marchés de l'énergie, par une flambée directe des prix ou par une insuffisance de l'approvisionnement peuvent avoir des impacts macroéconomiques dépassant largement la sphère énergétique. Les exemples les plus évidents sont les chocs pétroliers de 1973, 1979, et les phases de croissance rapide des prix comme entre 2004 et 2008. Il est crucial de pouvoir représenter ce type de chocs et les réactions d'ajustement pouvant entraîner des bifurcations technologiques (le choix du nucléaire en France à la suite des chocs pétroliers), parce que les politiques énergétiques ou climatiques visent précisément à minimiser les risques liés aux deux premiers types de chocs : recherche d'une plus grande indépendance ou frugalité énergétique, réduction des émissions de GES pour limiter le changement climatique, mesures d'adaptation préventive face aux événements climatiques. Du point de vue de l'analyse coûts-bénéfices des politiques éventuelles, les bénéfices des chocs évités, ou dont la propagation dans l'économie est atténuée grâce à ces politiques, peuvent représenter une part significative des gains totaux. Les négliger conduit par exemple à conclure que le changement climatique ne menace que quelques pourcents de PIB à un horizon de plusieurs décennies alors que de nombreux chocs successifs peuvent entraîner une amplification des pertes de manière significative (Ambrosi, 2004). Or, il n'est pas inutile de rappeler qu'aucun des exercices

passés en revue ne prend en compte les impacts du changement climatique à la fois sur l'évolution des préférences des consommateurs (loisirs, localisation...), des productivités sectorielles (sur l'agriculture ou même sur les pertes de performances des centrales nucléaires si les canicules sont amenées à se multiplier), des impacts d'événements extrêmes, de la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux côtés des mesures de réduction des émissions. La difficulté de prévoir et quantifier ces impacts conduit à cette simplification. Même si l'on peut penser que les impacts seront sans doute limités en France métropolitaine, il n'est pas inutile de renvoyer le lecteur vers l'évaluation des dommages menée par l'ONERC (2009).

D'autre part, il est irréaliste de penser que les stratégies facteur 4 pourraient se limiter à une action technologique rendue possible par l'introduction et l'augmentation progressive d'un prix du carbone. Le champ d'action est bien plus diversifié : réglementation, politiques d'infrastructures et aménagement du territoire, politiques sectorielles, subvention aux ENR (tarifs d'achat). Ainsi, Combet et al. (2009a) montrent, pour les transports, que des politiques dédiées³⁴ permettent de diviser par deux le niveau nécessaire de la taxe pour atteindre le facteur 4 en 2050. Ils utilisent pour cela un modèle (dit hybride) représentant l'évolution des systèmes technologiques en cohérence avec les contraintes macroéconomiques (modèle Imaclim-R).

Enfin, la taxe carbone offre l'opportunité d'un effet de levier sur la fiscalité. D'influents travaux antérieurs sur la notion de double dividende (Bovenberg et Mooij, 1994) ont mis en évidence qu'utiliser les revenus de la taxe carbone pour baisser la fiscalité sur le travail permettait de réduire les effets économiques négatifs de cette taxe carbone (Combet et al., 2009b).

2.3. Outil de modélisation pour ENCIOWCarb : Imaclim-R un modèle à la recherche d'une cohérence forte entre évolutions techniques et contraintes économiques

Il est donc nécessaire de disposer d'outils montrant les interactions entre systèmes techniques et contraintes économiques afin d'évaluer les stratégies d'atteinte du facteur 4. Ceci est l'objet de notre étude à venir dans le cadre d'ENCILOWCARB à l'aide du modèle hybride IMACLIM-R. Pour une description du modèle, nous renvoyons le lecteur à l'adresse suivante : www.imaclim.centre-cired.fr/

3. Quel rôle pour la modélisation : la construction de l'acceptabilité sociale ?

3.1. L'acceptabilité sociale des scénarios : une grande absence des évaluations

L'acceptabilité sociale devrait être le cœur d'un scénario car aller vers des trajectoires « bas

³⁴ Principalement une politique d'infrastructures doublée d'une politique de réorganisation des chaînes logistiques de production et de distribution visant à réduire le 'contenu transport' des consommations finales et une réorientation de l'urbanisme vers une limitation des besoins de mobilité.

carbone » impactera tous les secteurs, les modes de consommation, la vie quotidienne ; pour sa mise en œuvre il est donc essentiel qu'il soit soutenu par une majorité de parties prenantes dans la société : consommateurs, entreprises, salariés, collectivités territoriales...

L'acceptabilité sociale est importante renvoie à différents éléments d'un scénario :

- l'acceptabilité de technologies à haute risque (nucléaire, CCS)
- les impacts locaux de certaines politiques d'infrastructures (effet NIMBY concernant l'installation d'éoliennes par exemple ou la construction d'infrastructures de transports)
- les impacts sur l'activité des secteurs économiques et sur le secteur privé entraînant des adaptations nécessaires des modes de production qui seront affectés par une augmentation du prix de carbone (taxe, quotas d'émissions) avec ses effets sur l'emploi et la nécessaire gestion de la transition vers un monde sans carbone nécessitant des formations professionnelles
- les changements de comportements et de modes de consommation de la société
- la réorientation des investissements à moyen et long terme pour favoriser des technologies basses carbones, des infrastructures de transport public etc. et les effets d'éviction sur d'autres secteurs.
- la refonte de la fiscalité (fiscalité sur l'énergie vs fiscalité sur le travail) et l'arbitrage entre financement des retraites, de la sécurité sociale...

Or ces dimensions ne sont abordées que de manière parcellaire dans les exercices que nous avons analysés : seul négaWatt exclut de facto dans son scénario le recours au nucléaire et à la CC, technologies jugées trop risquées ; P. Radanne développe parmi les 19 variantes MIES un scénario sans nucléaire également ; le scénario MedProp-POLES limite au niveau actuel la capacité nucléaire dans l'avenir du fait de contrainte d'acceptabilité Par contre le scénario Markal n'hésite pas à envisager jusqu'à 90GW de nucléaire.

A part cette dimension d'acceptabilité des technologies, les autres aspects notamment quant aux politiques et mesures mises en place et leurs impacts sur les ménages ou activités économiques, à aucun moment ils ne sont traités.

Ceci pose d'autant plus de problèmes que l'on peut s'interroger comme on le voit dans la suite, sur le rôle de ces exercices de modélisation.

3.2. Des boîtes noires difficilement appropriables en dehors de la communauté de modélisateurs

Tout d'abord, la complexité des modèles, la diversité de leurs hypothèses et la dispersion de leurs résultats sont susceptibles de rendre inaudibles ou suspects les enseignements

potentiels des travaux numériques. Certes, le but de tels exercices n'est pas de prévoir le scénario le plus probable, mais bien de montrer, selon des hypothèses technologiques, des mix énergétiques cohérents avec une contrainte carbone. Pour le béotien, les différences dans les résultats sont difficilement explicables d'autant plus si le seul message communiqué se résume à la description ou de l'image du mix technologique ou du niveau de réductions d'émissions en 2050 sans que les hypothèses sous-jacentes ne soient réellement palpables. Quels sont les déterminants des résultats auxquels la démarche aboutit ? Quelles sont les contributions respectives d'un progrès technique autonome qui ne ferait que suivre une tendance passée, d'un progrès technologique induit par des politiques climatiques ou de changements de comportement du fait de politiques climatiques ou de l'évolution des préférences des consommateurs ?

Or les différences entre les hypothèses sur le progrès technique, sur les perspectives de pénétration des différentes technologies et sur les évolutions technologiques représentées s'expliquent par des hypothèses de natures bien différentes : purement technologiques ou plus politiques :

- Il est aisé, à l'aide d'approches d'ingénieur, telles que celles analysées ici, à partir du moment où des technologies sans carbone font partie de leur menu, de dessiner des systèmes futurs de production d'énergie très peu émetteurs de carbone. Cependant, la constitution du mix énergétique relève d'une expertise difficilement séparable des opinions du modélisateur ou du commanditaire ; tel fera un scénario 'doux' mobilisant les énergies nouvelles et renouvelables parce qu'il considèrera que le nucléaire ne répond pas aux critères de durabilité, tel autre mettra en scène la nouvelle corne d'abondance que constituerait une société de l'hydrogène ou du tout électrique adossé au nucléaire civil.

- Des différences apparaissent également sur les perspectives d'amélioration des technologies et de gains en efficacité énergétique en fonction de dires d'experts plus ou moins volontaristes ou récents. Ainsi le scénario négaWatt prévoit que la voiture à moteur à explosion consommera 3,3L/100km en 2050 quand le rapport Syrota table sur un niveau moyen du parc de 5,9L/100km. Qui a raison ? A quoi sont dues ces différences d'appréciations ? Quel est l'impact de ce type de différences sur les résultats ?

- D'autres différences proviennent de la part du gisement total d'efficacité énergétique qui sera effectivement mis en œuvre non pas d'un point de vue technique, mais du point de vue de l'ambition et de l'efficacité des mesures appliquées. Il en est ainsi des potentiels d'économie d'énergie pouvant être mis en œuvre dans le cas d'un programme de rénovation thermique de l'habitat. Tous les scénarios s'accordent sur la nécessité d'un tel programme, mais aucun ne met en œuvre ce programme de la même manière avec à la clé des performances chiffrées fort disparates : nombre de rénovations par an, niveau de consommation visé lors de la rénovation. Un des rôles de ces exercices devrait justement être d'évaluer selon le type de mesure par secteur (réglementation vs. mesure fiscale), les réductions d'émissions et les coûts associés.

- Enfin, dans de nombreux cas, la sobriété énergétique n'est pas mentionnée, car agrégée aux gains dus à l'efficacité énergétique. Le scénario négaWatt est le seul à la considérer de manière isolée, alors qu'il serait primordial d'identifier son potentiel puisque

la sobriété énergétique vise à supprimer les gaspillages. Ce sont donc des gains énergétiques gratuits, atteignables immédiatement à la différence des mesures d'efficacité énergétiques qui ne pénètrent qu'au rythme du renouvellement des parcs techniques. Toutefois, la sobriété énergétique suppose une évolution des comportements. Nous sommes aujourd'hui incapables de détailler les mesures nécessaires à un tel changement.

Dans ces conditions, il n'est pas difficile de comprendre que les résultats de ces exercices d'ingénieur apparaissent comme issus de véritables boîtes noires, difficilement appropriables en dehors d'une communauté de gens avertis (modélisateurs, institutions et commanditaires). Ces travaux ne font que révéler la vision d'un cercle fermé de personnes. Leur rôle et leur légitimité en sont donc limités.

3.3. La scénarisation comme outil de construction du consensus et d'appropriation sociale

Nous l'avons vu les modèles ou les scénarios tels qu'ils existent et tels qu'ils sont utilisés aujourd'hui apparaissent comme des boîtes noires pour qui ne fait pas partie du cercle proche du modélisateur. Ceci pose un problème d'autant plus important qu'il n'existe encore que peu de scénarios réalisés indépendamment de l'Etat et réalisés à un niveau politique suffisant pour porter le débat public. Ainsi, au travers des 7 exercices présentés ici, 4 sont issus de commandes institutionnelles (la MIES, la DGEMP, la Commission Syrota sur commande du premier ministre) avec un fort argument d'autorité. Or, tout d'abord, les messages portés par ces exercices ne sont pas anodins : une approche purement technologique, l'impossibilité à atteindre du facteur 4, un fort déploiement du nucléaire, et finalement un rôle du législateur et de l'état en retrait par rapport à l'action du marché et des acteurs privés... et d'autre part, s'ils doivent servir à la construction de la décision publique ils n'ont que la légitimité d'une communauté restreinte. Le risque est alors d'imposer des politiques climatiques par le haut et de manière déconnectée des autres enjeux de politique française alors que le climat est un problème de société à plusieurs titres :

- Il est impossible de parler de politiques climatiques sans parler de politiques en matière d'emploi (la rénovation thermique de l'habitat peut créer jusqu'à 200.000 emplois), sans parler de politique sociale avec l'apparition de ce qu'on appelle la précarité énergétique, sans parler de politique en matière de formation, d'infrastructures ou encore de logements.

- D'autre part, les questions qu'il faut aujourd'hui se poser sont celles de modes de vie et de société compatibles avec une division par 4 de nos émissions et de la transition vers une telle société, et ce dans tous les pans de nos actes de vie : avons-nous besoin d'une voiture pesant 1000 kg quand ce n'est que pour transporter la majeure partie du temps une personne de 80kg ? Avons-nous besoin en zone urbaine de posséder une voiture familiale par ménage alors que cette voiture ne transporte effectivement toute la famille que 1 mois par an ? A l'inverse de tous les scénarios décrits précédemment sauf du scénario négaWatt, il n'est plus temps de raisonner en niveaux de consommation énergétique, mais il faut se poser la question des usages et développer la notion de service énergétique. L'ampleur des changements nécessaires pour répondre au facteur 4 ne pourra se faire sans des modifications importantes à la fois sur nos modes d'organisation (posant la question des

choix de localisation des centres de production et des centres de consommation) et du côté de la demande. C'est sur ces modifications que les modèles buttent aujourd'hui, comme nous l'avons montré dans la première partie, car ceux que nous avons décrits ne sont tout simplement pas construits pour reproduire ces changements complexes et transversaux. Or l'évaluation de ces bifurcations sur la demande de biens et services ne pourra que se faire à l'appui de travaux renforcés avec les sociologues et avec les acteurs eux-mêmes de manière à tester l'acceptabilité sociale des mesures permettant de mener à bien ces bifurcations.

Les outils de modélisation pourraient donc servir de boîtes de dialogue et d'outils de confrontation entre les parties prenantes de la société civile, de l'économie et de la politique de manière à élaborer conjointement une trajectoire cohérente et acceptable par les plus nombreux d'entre nous, définir les réallocations sectorielles, les compensations nécessaires. Un tel exercice aurait été fort utile dans la définition de la taxe carbone (sur le niveau de prélèvement, sur la redistribution, sur les exonérations). L'enjeu est donc d'accompagner les travaux de modélisation par des échanges au sein d'une plateforme entre modélisateurs, économistes, technologues, sociologues et représentants de la société civile.

De tels modèles devront intégrer les interactions entre l'évolution des systèmes techniques et les contraintes macroéconomiques. Un dialogue élargi ne sera possible qu'en traduisant les données du modèle à la fois en données économiques (prix, niveaux de taxe, taux d'emploi, parts de budgets des ménages...) et en données physiques énergétiques (Mtep, TWh...) mais aussi et surtout aptes à représenter l'évolution des modes de vies et des préférences des consommateurs: la forme des villes, le nombre de m² par ménage, les taux d'équipement, temps de transport quotidien, distance domicile-travail.

3.4. Définition du cadre méthodologique de construction des scénarios ENCIowCarb

Dans le cadre du projet EnciLowCarb, la construction des scénarios et des mesures permettant le respect de nos objectifs de réduction sera basée sur un dialogue interactif entre :

- des modèles macro-économiques (IMACLIM-R pour la France et REMIND-R pour l'Allemagne) analysant les impacts de différents paquets de mesures politiques sur les activités sectorielles, le marché du travail, les prix des biens de consommation...
- et les parties prenantes (représentants du secteur industriel, des syndicats, des associations de consommateurs,...) rassemblées dans le cadre de tables rondes en présence des équipes du projet.

Les hypothèses du modèle devront être traduites en grandeurs physiques et validées par les parties prenantes, permettant une appropriation par ces parties prenantes pour la suite des résultats des modèles. Ensuite, des jeux de politiques et mesures permettant de mener vers des trajectoires sobres en carbone seront sélectionnées par l'ensemble des parties prenantes et donneront lieu à des simulations débouchant sur une trajectoire d'émissions de GES et des impacts économiques. Ceux-ci seront commentés et éventuellement d'autres ensembles de politiques et mesures seront proposés. Le but de ces simulations

incrémentales est d'aboutir à un compromis en termes de jeu de politiques et mesures permettant d'atteindre une certaine trajectoire sobre en carbone fixée au préalable.

4. Aller au-delà des visions uniquement technologiques : Sobriété, efficacité énergétique ou rupture technologique ?

Dans l'ensemble de ces scénarios, l'efficacité énergétique est généralement améliorée, mais :

- L'analyse des potentiels divergent, reflétant souvent des différences de vues sur les potentiels techniques, mais aussi à potentiel technique donné sur les possibilités de mise en œuvre de ces potentiels (nécessité de contrôle, d'incitations efficaces voire d'obligation dans le cas de la rénovation thermique de l'habitat).
- Sobriété énergétique et efficacité sont souvent confondues alors que les leviers pour leur mise en œuvre sont différents. Seul le scénario négaWatt en établit une nomenclature précise.

4.1. Des analyses des potentiels d'efficacité énergétique divergents

NégaWatt

Le scénario négaWatt est le scénario qui va le plus loin dans les possibilités de réduire les consommations énergétiques par la sobriété énergétique. Par rapport au scénario tendanciel 23% des économies d'énergie de l'énergie primaire (38% de l'énergie finale) sont dues à la sobriété énergétique : notamment dans le secteur du bâtiment. Le reste des réductions est partagé entre l'efficacité sur l'offre (41%) et sur la demande (36%). Le ratio énergie primaire / finale augmente de 65% en 2000 à 84% en 2050.

NégaTep

.Ce scénario ne suppose pas de changements de comportements importants et en global les économies dues à la sobriété et l'efficacité sont estimés avec beaucoup de précaution.

MIES :

Le rapport MIES établit 3 niveaux de mise en œuvre des potentiels d'efficacité énergétique : pas de progrès – amélioré – très renforcé. Un niveau « rupture technologique » est également pris en compte. Toutes les variantes de facteur 4 doivent mobiliser la totalité des potentiels d'efficacité énergétique, ce qui correspond à un gain moyen d'intensité énergétique de 26%³⁵.

³⁵ L'introduction de nouvelles technologies permet d'augmenter ce chiffre à 34%.

ENERDATA

Le scénario de réduction Enerdata ne suppose pas un changement de comportement vers plus de sobriété énergétique mais les auteurs notent qu'elle représente une source d'économies importante.

Prévoit

Selon le scénario d'Henri Prévot l'objectif de division par 2,7 pourrait être atteint sans modification rédhibitoire de comportement : stabilisation de la consommation finale d'énergie qui, grâce au progrès technique, permettrait une amélioration du confort thermique (par l'isolation tout en diminuant les usages thermiques de 14%) et une augmentation de 25 % des distances parcourues sur route ou par avion.

Concernant le secteur du bâtiment, l'énergie requise pour le chauffage diminue mais il est impossible de dire si c'est dû à des systèmes plus performants ou un taux de construction dans le neuf à performance élevée. Enfin, le scénario ne tient pas compte des potentiels en termes de sobriété énergétique.

Syrota

Les hypothèses des scénarios ont été établies sans supposer de modifications radicales dans les comportements : pas de prise en compte de la sobriété, ni de l'effet rebond.

Le rapport explicite clairement qu'il n'intègre pas non plus dans les transports les effets d'un développement massif du télétravail, dans le secteur industriel, les effets que pourraient produire des substitutions massives de matériaux (matériaux composites, aluminium/acier ou plastiques/verre) ou un changement complet de la logistique de transport des marchandises.

Concernant le secteur du transport l'efficacité des véhicules augmente et la technologie évolue vers moins d'émissions mais les km par personne restent stables. Pareil pour le secteur du bâtiment, les réductions des besoins pour le chauffage sont dues à des efforts de rénovation thermique.

Les réductions dues à l'efficacité énergétique varient fortement entre les deux scénarios : -38% pour MedPro-Poles et stabilisation pour Markal en 2050.

4.2. Vers une nomenclature efficacité énergétique / sobriété énergétique

Souvent potentiels en matière d'efficacité énergétique et en matière de sobriété sont confondus alors que les leviers pour les mettre en œuvre sont très différents devant s'adresser dans un cas à la technologie ou à l'adoption des technologies et de l'autre uniquement aux comportements. Il est donc important de les distinguer dans les évaluations. Nous nous basons ici sur une classification proposée par l'Association négaWatt puisque c'est ce scénario qui pousse la réflexion et l'analyse sur l'efficacité énergétique et

sur la sobriété le plus loin. Cette réflexion est plutôt axée sur le secteur du bâtiment, dont le traitement dans le scénario négaWatt constitue la grande richesse.

Ainsi, selon négaWatt il existe (pour le secteur de la construction) 4 différents leviers pour améliorer l'efficacité énergétique :

- **Diminuer l'énergie grise** utilisée (efficacité éco-constructive). Les réductions de consommation d'énergie sont possibles du fait d'une d'optimisation en amont en en aval de l'usage (lors de la fin de vie des matériaux ou en amont lors de la fabrication des matériaux).
- **Augmenter l'efficacité bio-adaptative** désigne la **diminution des besoins en énergie utile**. Dans le secteur de l'habitat, ceci renvoie à l'amélioration de l'isolation ou à l'augmentation des apports passifs de l'habitat ; pour la construction des véhicules, au choix d'une forme aérodynamique.
- **Augmenter l'efficacité d'appareillage** améliore l'utilisation de l'énergie finale en augmentant le rendement des appareils et la limitation de fuites. C'est le rôle joué par l'étiquette énergie pour les appareils électroménagers.
- **Augmenter l'efficacité du système productif** et donc l'utilisation de l'énergie primaire. Ici il s'agit d'améliorer la conversion d'énergie et de récupérer au maximum l'énergie « perdue ».

Cette nomenclature étant établie pour le secteur des bâtiments principalement, elle ne permet pas de classer les gains en efficacité énergétique du fait du développement des transports alternatifs à la route, notamment grâce au développement des infrastructures dédiées. Nous introduisons donc cet autre levier dans le tableau ci-dessous.

Toujours selon négaWatt, la sobriété énergétique peut être différenciée selon 3 types :

- **La sobriété dimensionnelle** qui suppose de choisir la bonne dimension et d'éviter le surdimensionnement qui entrainera une surconsommation d'énergie inutile.
- **La sobriété d'usage** renvoie à la durée d'utilisation et d'exploitation et donc à la production de produits durables dans le temps.
- **La sobriété conviviale** fait référence aux sources d'économies d'énergies possibles du fait d'une meilleure organisation collective du territoire (covoiturage), de l'urbanisme et la mutualisation de l'utilisation des appareillages (comme le lave linge partagé dans un immeuble collectif).

Cette différenciation entre les sources d'économies d'énergie permet de mieux définir les mesures politiques nécessaires pour stimuler l'action et mieux évaluer leur possible efficacité. Elle permet également de mieux comprendre qui est l'acteur cible adéquat pour initier le changement de comportement.

Une dimension qu'il ne faut pas non plus oublier dans les évaluations lorsque l'on commence à évaluer les potentiels en termes d'efficacité énergétique est l'effet rebond sur les consommations énergétiques du fait de l'augmentation de l'efficacité énergétique.

Le tableau ci-dessous représente une grille de lecture des différents scénarios par rapport à la classification proposée (il manque très souvent les informations détaillées concernant la prise en compte ou non de la dimension mentionnée, dans ce cas nous avons considéré que la dimension en question n'a pas été prise en compte).

Tableau 54 : Sobriété et efficacité énergétique dans les scénarios analysés

Type	NégaWatt	NégaTep	MIES	PrévoT	Enerdata	Syrota
Efficacité éco-constructive	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Efficacité bio-adaptative	Représentation très détaillée de rénovation thermique de l'habitat et de RT	Oui. L'efficacité bio-adaptative et l'efficacité de l'appareillage permettent dans le secteur du bâtiment de diminuer de 15Mtep la consommation d'énergie.	Renforcement des normes de consommation énergétiques postulé véhicules moins consommateurs d'énergie	Renforcement isolation : -14%	Technologies « très basses consommations » pour l'habitat	Rénovation thermique
Efficacité d'appareillage	Généralisation étiquette énergie	- Renforcement efficacité appareillage = besoins électricité spécifique = -10%	Oui	Bâtiments : systèmes bi-énergie de chauffage Transports : Efficacité véhicules particuliers : -18%	Amélioration de l'efficacité énergétiques des appareils, mais effet rebond conduit à une augmentation des besoins en électricité spécifique	Oui
Efficacité du système productif	Industrie	Industrie et agriculture : besoins énergétiques diminuent de 10% par rapport à 2000. Aucun détail n'est donné	Oui pour industrie Combien ?	Oui	Oui	Oui
Efficacité infrastructures	Oui		Oui, mais pas de détail	Doublement transport ferroviaire mais Augmentation de 25% distances route + aérien	multiplication par 5 des km parcouru avec le train	
Sobriété dimensionnelle	Taille des logements, taille des voitures	Non	Véhicules plus petits	Non	Technologies « très basses consommations pour les véhicules	Non
S. d'usage	T° de chauffage	« modification des comportements » : pas décrit, ni détaillé	Conduite plus souple	Oui	Non	Non
S. conviviale	Covoiturage	Non	Non	Non	Non	Non

La grande majorité de scénarios met l'accent sur l'amélioration de l'efficacité de l'appareillage et du système productif car il est plus simple d'appréhender l'impact de mesures centralisées comme de normes pour des frigos ou de critères d'augmentation de rendements de centrales thermiques.

Par contre aucun des scénarios ne prend en compte ou n'explique l'énergie dépensée sous forme d'énergie grise. Celle-ci peut apparaître par la décroissance des consommations d'énergie dans le secteur industriel. Dans ce cas, elle est noyée dans le contenu énergétique de la production industrielle et très peu de scénarios portent une expertise détaillée pour ce qui est de l'évolution de ce secteur. D'autre part, comme une partie importante de nos biens de consommations sont importés, la consommation d'énergie ou les émissions nécessaires à leur production ne sont pas prises en compte dans la comptabilisation de la consommation énergétique et des émissions ; ceci constitue un point faible très important de ces méthodologies.

4.3. Proposition méthodologique ENCI_{LowCarb}

Les scénarios Enci_{LowCarb} veilleront à élaborer une nomenclature détaillée (se basant sans doute sur le tableau 51) des potentiels techniques de sobriété énergétique d'une part, d'efficacité énergétique de l'autre et de l'efficacité spécifique des mesures permettant leur déploiement. Ces analyses seront partagées avec les parties prenantes.

5. Trajectoires de réductions ENCI_{LowCarb} : Respecter le 2°C, Facteur 4 ou plus

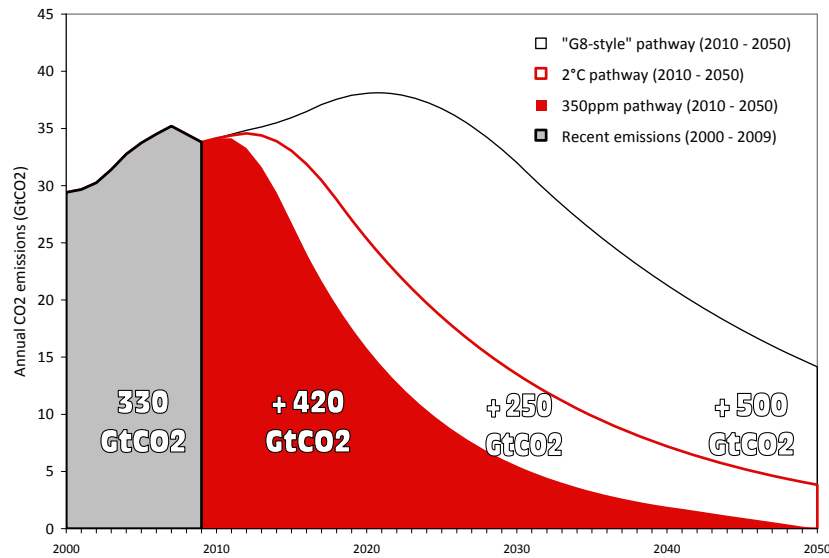
Nous avons qu'aucun des scénarios existants pour la France ne permet de faire du facteur 4. Dans le cadre du projet nous nous plaçons dans une perspective un peu différente : nous ne nous basons pas sur les objectifs législatifs français, mais sur les impératifs climatiques pour avoir de grandes chances de rester en deçà d'un réchauffement planétaire moyen de 2°C.

Ainsi, le dernier rapport du GIEC (2007) établit qu'une trajectoire d'émissions cohérente avec un objectif de réchauffement de 2°C nécessite des réductions d'émissions mondiales de l'ordre de 50% à 85% en 2050 par rapport à 2000. Meinshausen et al. (2009) dans une publication de Nature calcule selon des niveaux de réductions mondiales en 2050 la probabilité d'excéder le 2°C³⁶.

La figure 21 montre les émissions de CO₂ mondiales de 2000 – 2009 en gris, la trajectoire 350 ppm en rouge, une trajectoire 2°C (la ligne rouge fine) et une trajectoire « style « G8 » correspondant à une diminution de 50% de nos émissions en 2050 (ligne grise). La figure indique aussi le nombre de Gt CO₂ que des trajectoires moins ambitieuses ajouteraient aux émissions cumulées.

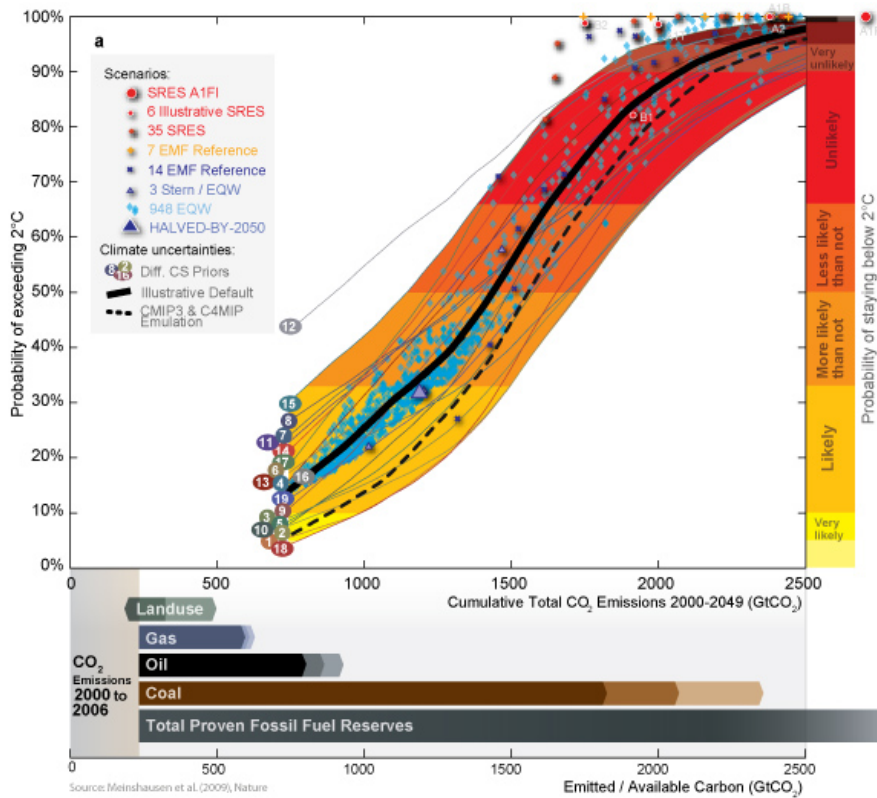
³⁶ A noter que l'outil fourni par Meinshausen sous la forme d'un tableau Excel ne fournit d'indicateurs de probabilité pour un objectif de réchauffement en deçà de 2°C.

Figure 21 : Trajectoires d'émission 2000-2050



Source : CAN Europe basé sur Meinshausen (2009) et Hansen (2009)

Figure 22 : Probabilité de ne pas dépasser une augmentation de température de 2°C



La figure 22 montre la probabilité pour plusieurs scénarios de respecter une augmentation maximale de 2°C en 2050. Les scénarios du GIEC (SRES A2, B1, B2, A1FI) ont tous une probabilité élevée de dépasser cet objectif : B1 = 80%, B2, A2 et A1FI presque 100%.

Dans le cadre du projet ENCI Lowcarb, les scénarios élaborés se réfèrent à des niveaux de probabilité de rester en dessous de 2°C de 66% et 75% se référant respectivement à des

niveaux globaux de réduction des émissions des émissions de GES en 2050 par rapport à 1990 de 54% et 65% (voir la figure ci-dessous), selon les résultat du modèle CLIM développé par le PIK. Considérant le scénario central de démographie de l'ONU au niveau mondial (8,9mrd personnes) et pour la France, ces objectifs se traduisent par des cibles d'émission par tête de 387kgC et de 235kgC par personne³⁷ selon une règle de contraction et convergence en 2050. Ceci constitue des facteurs de réduction de 4,1 et 6,6 respectivement par rapport aux émissions françaises de 1990 (107MtC en 1990 sur le seul périmètre des émissions de carbone énergétique).

Figure 23 : Trajectoires mondiales d'émission de CO2 (GtC) énergétique pour des niveaux de probabilité de respecter le 2°C de 66 et 75%

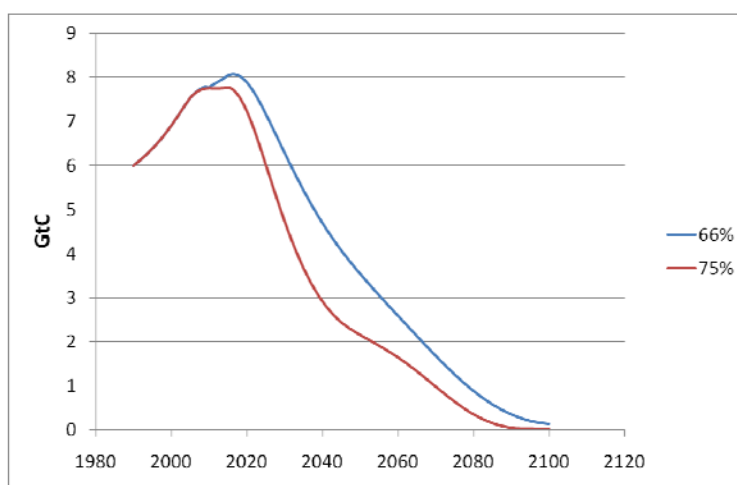
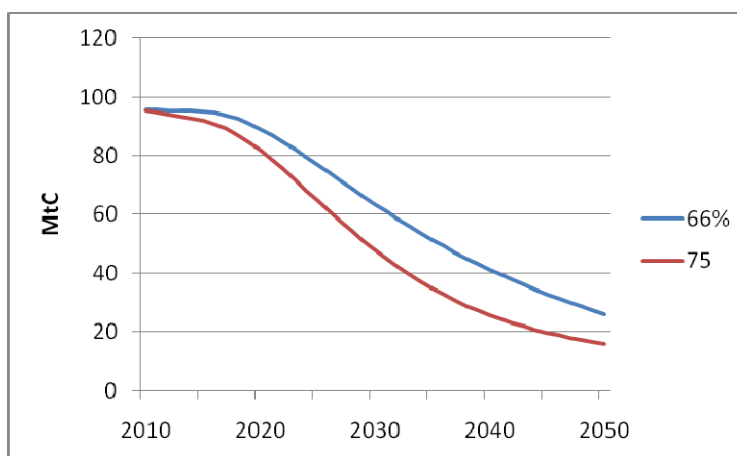


Figure 24 : Trajectoires d'émission de CO2 (GtC) énergétique pour la France pour des niveaux de probabilité de respecter le 2°C de 66 et 75% selon une règle d'allocation de contraction et convergence en 2050



³⁷ Il s'agit d'un approche « contraction and convergence » où chaque citoyen du monde aura les mêmes émissions en 2050.

Tableau 55: Trajectoires de réduction des émissions pour la France correspondant à des niveaux de probabilité de 66 et 75% pour les seules émissions de carbone énergétique

	2010	2020	2030	2040	2050
66%	96	89	64	41	26
	-12%	-18%	-41%	-62%	-76%
75%	95	82	48	26	16
	-12%	-25%	-56%	-76%	-85%

La construction de la trajectoire permet à la France de respecter l'objectif intermédiaire en 2020 fixé par le paquet climat énergie Européen (PCE) soit une réduction de -17% en 2020 par rapport à 1990 (voir tableau ci-dessus).

6. Nomenclature des scénarios

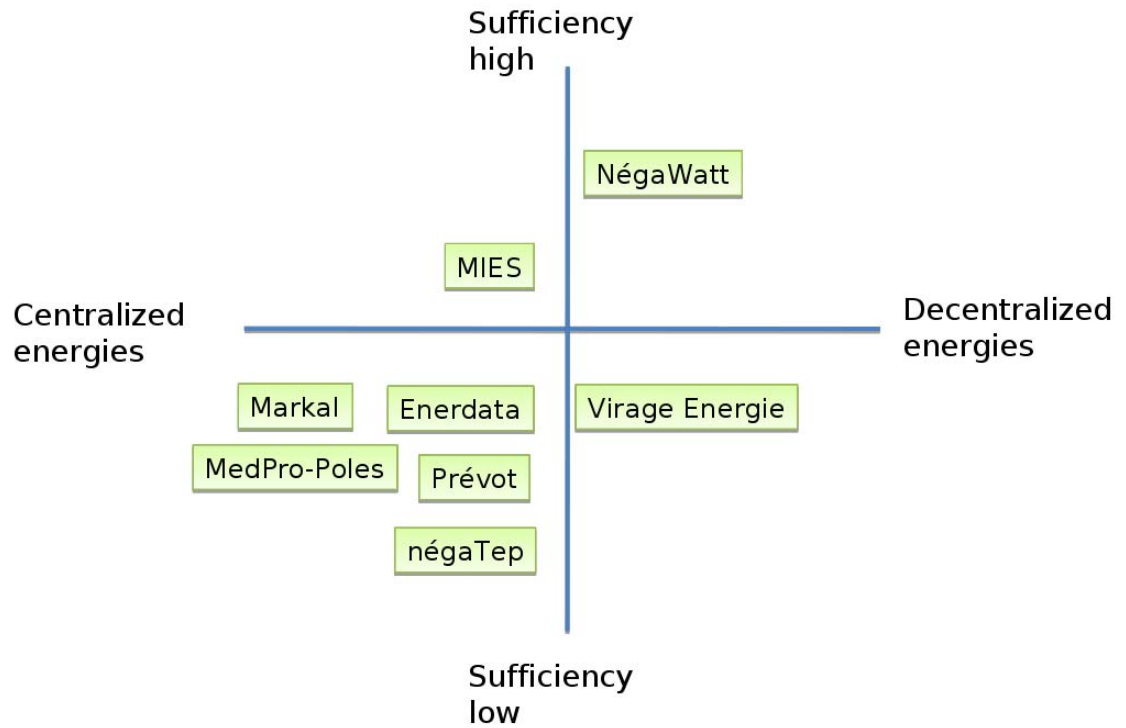
Les scénarios que nous allons développer dans le cadre du projet EnciLowCarb auront pour caractéristiques :

- Comme pour les autres scénarios, seules seront prises en compte les émissions de CO2 énergétiques, émises sur le territoire. Néanmoins, une discussion sera menée à chaque fois quant à l'impact des scénarios représentés sur le contenu en carbone de la balance commerciale, les émissions non CO2 et notamment du secteur agricole dans le cas de développement des agrocarburants produit au niveau national ou importés ;
- Evaluation économique des mesures de réduction des émissions : 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 ;
- Contenu matériel de la croissance et styles de développement
- Concertation des parties prenantes autour des résultats des scénarios sous la forme d'un dialogue entre modélisation et partie prenante, construction de l'acceptabilité sociale des mesures ;
- Représentation de la pluralité des visions quant à l'évolution technologique 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.

Nous avons situé chacun des scénarios existants sur ces axes (Figure 25). La plupart des scénarios se situent dans le quart « production d'énergie centralisée et sobriété énergétique faible ». C'est pourquoi le projet ENCIlowcarb s'attachera particulièrement à développer un scénario « production décentralisée et sobriété élevée.

Figure 25 : Catégorisation des scénarios analysés

Alternatives scenarios



Bibliographie

- Acket C., Bacher P. (Association Sauvons le Climat), 2007, Diviser par 4 nos rejets : le scénario Negatep, <http://www.sauvonsleclimat.org/documents-pdf/Negatep.pdf>
- Allen P., Helweg-Larsen T., Bull J., 2007, « Zerocarbon Britain », CAT Center for alternative technologies.
- Association négaWatt, 2006, Scénario négaWatt 2006, pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable, document de synthèse, Paris, 16 décembre 2005. [http://www.negawatt.org/telechargement/Scenario%20nW2006 Synthesev1.0.2.pdf](http://www.negawatt.org/telechargement/Scenario%20nW2006%20Synthesev1.0.2.pdf)
- de Boissieu C. (sous sa présidence), 2006, « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 », Groupe Facteur 4.
- Chambolle T., 2007, Partie 5 - Scénarios énergétiques, Rapport du Groupe de Travail 5, Président Thierry Chambolle, rapporteur Hervé Pouliquen, in Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050, rapport d'orientation, Centre d'Analyse Stratégique, Combet E., Gherisi F., Guivarch C., 2009a, Les transports et le Facteur 4 – Entre diversification des signaux et réforme fiscale, Rapport final PREDIT GO n°11 Politique des transports, 26 juin, 61pp.
- Combet E., Gherisi F., Hourcade J.C., 2009b, Taxe carbone, une mesure socialement régressive ? Vrais problèmes et faux débats", WP CIRED.
- Commission Energie. http://www.strategie.gouv.fr/article.php3?id_article=675
- Dessus B., 2008, Effet de serre, n'oublions pas le méthane, La Recherche, numéro 417, mars.
- Enerdata-Lepii, 2005, Etude pour une prospective énergétique concernant la France, Observatoire de l'Energie, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, 89pp.
- Hourcade, J.C., 2007, « Les modèles dans les débats de politique climatique : entre le Capitole et la Roche tarpéienne ? », « Les modèles du futur » La Découverte.
- Luderer, Gunnar / Bosetti, Valentina / Jakob, Michael / Steckel, Jan / Waisman, Henri / Edenhofer, Ottmar (2009): Towards a better Understanding of Disparities in Scenarios of Decarbonization: Sectorally Explicit Results from the RECIPE Project, Fondazione Eni Enrico Mattei
- Nakano, S. *et al.* (2009), "The Measurement of CO2 Embodiments in International Trade: Evidence from the Harmonized Input-Output and Bilateral Trade Database", *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, 2009/3, OECD publishing, © OECD.
- Nitsch, J., 2008, Leitstudie 2008, Further development of the "Strategy to increase the use of renewable energies" within the context of the current climate protection goals of Germany and Europe, Study commissioned by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), octobre, 188pp. http://www.bmu.de/english/renewable_energy/downloads/doc/42726.php
- Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique, 2009, Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France, septembre, <http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>
- Prévot H., 2004, Politique énergétique nationale et lutte contre l'effet de serre, la Revue de l'énergie, n°554, février 2004
- Prévot H., 2007, Trop de Pétrole, Le Seuil, 288pp.
- Quinet, E. (sous sa présidence), 2008, « La valeur tutélaire du carbone », Centre d'analyse stratégique
- Quirion, Philippe (2009) : - 30% de CO2 = + 684 000 emplois - L'équation gagnante

pour la France, étude pilotée par le WWF-France

Radanne P., 2004, La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, 36pp.
http://www.drire.gouv.fr/rhone-alpes/energie/contenu_secours_schema3/div4_des_émissions_de_CO2_en_France_2050.pdf

Réseau Sortir du nucléaire, Les 7 vents du Cotentin (2006) : « Un courant alternatif pour le Grand Ouest - Etude sur les alternatives au réacteur EPR »

Syrota, J, 2007, « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », Centre d'analyse stratégique

Virage énergie, 2008, « Energie de demain », Association Virage Energie