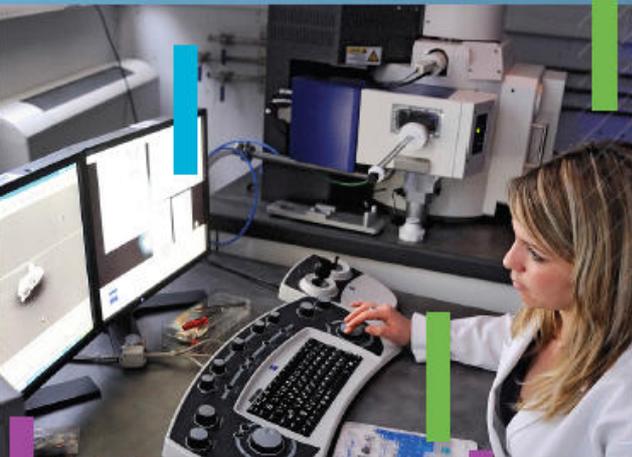




# SCÉNARIOS DE L'ANCRE

POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Rapport 2013



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie





## Avant-propos

Conséquence des rapports du GIEC sur l'évolution du climat, la transition énergétique est devenue un objectif prioritaire mondial, objectif auquel le gouvernement français a donné un élan particulier en 2013 en lançant un grand débat public. L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE<sup>1</sup>) a souhaité apporter une contribution au Débat National sur la Transition Énergétique et a mobilisé en ce sens les chercheurs qui participent à ses groupes programmatiques.

L'ANCRE a voulu axer sa démarche sur la recherche de trajectoires fortement contrastées, permettant d'évaluer pour chacune d'entre elles les conditions nécessaires, les implications économiques, sociétales, environnementales et bien évidemment les besoins en termes de recherche et développements, au cœur des préoccupations de l'Alliance.

L'exercice a été mené autour d'un objectif structurant de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre, et d'un appel accru aux énergies renouvelables, à la sobriété et à l'efficacité énergétique. Il a conduit à la proposition de trois scénarios de base, auxquels nos chercheurs ont adjoint un scénario alternatif, allégeant la contrainte temporelle sur la réduction de la part du nucléaire, en rapport avec les constantes de temps de transformation de cette source d'énergie.

Ce rapport montre bien que le chemin vers un panorama énergétique durable demandera des efforts importants d'adaptation des politiques de réglementation et de prix de l'énergie, mais également des investissements substantiels, et particulièrement des investissements de R&D afin de lever les verrous scientifiques et techniques que ce rapport identifie clairement. Des progrès voire des ruptures technologiques, fondés sur une recherche d'excellence et coordonnée, est indispensable pour construire la route entre le mixte énergétique actuel et celui que l'on peut anticiper pour notre société à l'horizon 2050.

L'étude a atteint un degré de maturité qui justifie qu'elle vous soit présentée aujourd'hui. Elle est le fruit d'un travail impressionnant de la communauté scientifique, qui a su établir un dialogue fécond entre les différentes disciplines et domaines de recherche. L'exercice qui a été mené est complexe et exigeant. La pertinence des choix énergétiques doit se fonder sur une analyse multicritère approfondie, qui n'a encore pu être abordée que partiellement.

Il revient donc à l'ANCRE et aux partenaires qui la composent, de donner aux chercheurs qui se sont déjà largement investis dans cet exercice, les moyens de le poursuivre, et j'y veillerai personnellement.

Jacques Bittoun

Président de l'ANCRE

---

<sup>1</sup> Créée le 17 juillet 2009 à l'initiative des ministres en charge de l'Écologie, de l'Énergie et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. L'ANCRE a pour mission de mieux coordonner et renforcer l'efficacité des recherches sur l'énergie menée par les organismes publics nationaux qui en sont membres (CEA, CNRS, CPU, IFPEN, ANDRA, BRGM, CDEFI, CEMAGREF, CIRAD, CSTB, IFREMER, INERIS, INRA, IFSTTAR, INRIA, IRD, IRSN, LNE, ONERA)



# ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie



## Sommaire

Résumé exécutif .....	5
Introduction .....	11
1. Comprendre le système énergétique.....	14
1.1. Les déterminants de la demande d'énergie et des émissions de CO <sub>2</sub> par secteur.....	14
1.1.1. Résidentiel-Tertiaire .....	14
1.1.2. Transport .....	16
1.1.3. Industrie.....	18
1.1.4. Agriculture, Sylviculture et mobilisation de la biomasse.....	19
1.2. Offre, équilibre des systèmes énergétiques et émissions de CO <sub>2</sub> .....	19
1.2.1. Les sources d'énergie .....	19
1.2.2. Vecteurs énergétiques.....	24
1.2.3. Réseaux et Stockage.....	25
1.2.4. Bilan énergie et CO <sub>2</sub> de la France.....	27
2. Les lignes directrices des scénarios de l'ANCRE .....	29
2.1. Le scénario « Sobriété renforcée » SOB .....	30
2.2. Le scénario « Décarbonation par l'électricité » ELE .....	30
2.3. Le scénario « Vecteurs diversifiés » DIV.....	30
2.4. Les autres scénarios.....	31
2.4.1. La variante « Nucléaire et EnR » : ELEC-V .....	31
2.4.2. La trajectoire de référence, dite « tendancielle » TEND .....	31
3. Les résultats.....	32
3.1. Résultats sur la consommation d'énergie.....	32
3.1.1. Bilan en consommation d'énergie primaire.....	32
3.1.2. Bilan en consommation d'énergie finale.....	33
3.1.3. Evolution de la consommation d'énergie dans le résidentiel-tertiaire.....	34
3.1.4. Evolution de la consommation d'énergie dans les transports.....	36
3.1.5. Evolution de la consommation énergétique de l'industrie .....	39
3.1.6. Evolution de la consommation énergétique de l'agriculture .....	44
3.2. Résultats pour la production d'énergie.....	44
3.2.1. Bilan de la production d'énergie.....	44
3.2.2. Bilan des émissions de CO <sub>2</sub> .....	48
4. L'évaluation des scénarios de l'ANCRE.....	50
4.1. Les critères d'ordre économique .....	50



4.1.1.	Trajectoire d'investissement.....	50
4.1.2.	Coûts et prix de l'énergie .....	56
4.1.3.	Bilan économique pour les ménages .....	60
4.1.4.	Emplois, filières professionnelles et activité économique.....	60
4.1.5.	Bilan économique pour les finances publiques .....	66
4.2.	Les critères d'ordres environnementaux et sociétaux.....	67
4.2.1.	Biodiversité et impact environnementaux .....	67
4.2.2.	Changement climatique .....	68
4.2.3.	Impacts santé, accidents, risques et sûreté.....	68
4.3.	Les critères d'ordres politiques et stratégiques .....	69
4.3.1.	Robustesse et résilience du système .....	69
4.3.2.	Matériaux stratégiques et gestion des ressources naturelles.....	70
4.3.3.	Indépendance énergétique et sécurité d'approvisionnement .....	71
4.4.	Bilan de l'évaluation multicritères .....	72
5.	Conséquences pour la recherche .....	79
5.1	Les scénarios supposent la levée de verrous majeurs.....	79
5.2	Priorités de recherche/maturité des technologies .....	80
5.2.1.	La maîtrise de la demande.....	80
5.2.2.	Priorités de recherche pour une offre de technologies compétitives de production de vecteurs énergétiques .....	81
5.2.3.	Priorités de recherche visant l'efficacité du système énergétique .....	83
5.2.4.	Options destinées à compenser les risques en matière d'approvisionnement liés à la transition énergétique .....	84
5.2.5.	Remédier à l'impact de l'utilisation des hydrocarbures sur les émissions : la CSC-CUC .....	85
5.3	Financement de la recherche dans le domaine de l'énergie et implication de l'ANCRE.....	85
5.3.1.	Les évolutions du financement de la recherche dans l'énergie en France.....	86
5.3.2.	Evaluation du besoin, des pistes de financements et rôle de l'ANCRE .....	87
	Conclusion.....	88
	Annexe 1 : Détails sur le passage des émissions de CO <sub>2</sub> énergétique aux émissions « tous GES » .....	95
	Annexe 2: Compléments sur la biomasse.....	103
	Annexe 3 : Complément sur les investissements dans le secteur du Résidentiel-Tertiaire .....	105
	Annexe 4 : La valeur du carbone dans les scénarios de l'ANCRE .....	110
	Annexe 5 : R&D et chronologie de déploiement des technologies .....	113
	Annexe 6 : Liste des contributeurs .....	114



## Résumé exécutif

A l'automne 2012, l'ANCRE a entrepris l'élaboration de scénarios énergétiques afin d'apporter des éléments d'éclairage dans le cadre de la préparation du projet de loi de transition énergétique attendu en 2014. L'objectif poursuivi était de définir des trajectoires contrastées et d'évaluer pour chacune d'entre elles les conditions nécessaires, notamment en termes de disponibilité des technologies, ainsi que leurs implications économiques, sociales et environnementales.

### *La démarche*

Pour cet exercice, l'Alliance des organismes de recherche publique français a retenu un cadre défini par l'objectif de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, l'hypothèse gouvernementale d'une réduction à 50% à l'horizon 2025 de la part de l'énergie nucléaire dans le mix électrique, l'évolution d'un mix vers davantage d'énergies renouvelables et un effort soutenu de sobriété et d'efficacité énergétique. Les trajectoires proposées partent d'une analyse des déterminants de la demande – globale et par secteur – et de l'offre énergétiques ainsi que des émissions de CO<sub>2</sub>. Elles prennent en compte les marges de manœuvre en termes d'usages de l'énergie – y compris en matière de transfert entre vecteurs énergétiques – et les évolutions permises par le progrès technologique.

Les trois scénarios proposés se caractérisent de la façon suivante :

- le scénario « Sobriété renforcée » (**SOB**) repose essentiellement sur le triptyque sobriété poussée, efficacité énergétique renforcée et développement des énergies renouvelables ; ce scénario requiert un effort généralisé d'efficacité ainsi que des changements significatifs de comportements ;
- le scénario « Décarbonation par l'électricité » (**ELE**) est fondé sur la combinaison d'un effort marqué d'efficacité énergétique et d'un accroissement dans les usages de la part de l'électricité – décarbonée parce que d'origine renouvelable ou nucléaire – en substitution aux énergies fossiles, même dans leurs usages aujourd'hui captifs, comme dans les transports ;
- le scénario « Vecteurs diversifiés » (**DIV**<sup>2</sup>) mise sur l'efficacité énergétique et un renforcement limité des usages électriques, mais l'accent est largement mis sur la diversification des sources et des vecteurs d'énergie, avec notamment la récupération des chaleurs perdues et un rôle important des systèmes énergétiques intelligents multi-vecteurs et développés localement.

A l'issue d'une première phase de caractérisation des scénarios, la multiplicité des conditions nécessaires pour atteindre l'objectif poursuivi de réduction des émissions de gaz à effet de serre a conduit à proposer une trajectoire complémentaire au scénario **ELE**, le scénario **ELEC-V**, dans laquelle la contrainte de réduction en 2025 de la part du nucléaire dans le mix est relâchée.

---

<sup>2</sup> Ce scénario figure parmi les quatre retenus dans le cadre du Débat National sur la Transition Énergétique et pour les travaux qui lui succèdent comme référence d'une trajectoire misant sur des efforts d'efficacité énergétique modérés et sur une diversification du mix énergétique.



## *Les résultats des scénarios*

Selon les scénarios, la consommation d'énergie primaire décroît de 18% à 32 % pour atteindre entre 179 Mtep (**SOB**) et 218 Mtep (**ELE**) en 2050. En termes d'énergie finale, cette baisse se situe entre 27% (**ELE, DIV, ELEC-V**) et 41% (**SOB**).

Ces évolutions résultent :

- d'efforts considérables en termes de rénovation lourde du parc de bâtiments : 650 000 logements et 25 millions de m<sup>2</sup> par an font l'objet d'une rénovation thermique dans le scénario **SOB**, aboutissant à une division par deux de la demande d'énergie en 2050, dans les autres scénarios, les rythmes de rénovations sont plus modérés (350 000 logements et 15 millions de m<sup>2</sup>) avec à la clé une réduction de 20% de la demande d'énergie du secteur résidentiel tertiaire en 2050 ;

- de modifications de comportement en matière de mobilité et de mode de transport dans le scénario **SOB** (baisse du recours à la voiture – de 80% à 50 % – et au transport routier de marchandise – multiplication par trois du ferroviaire –), d'une accélération de la pénétration des technologies alternatives au couple traditionnel moteur à combustion interne/carburants fossiles, notamment dans les scénarios **ELE** et **DIV** (les véhicules hybrides rechargeables et électriques représentent entre 25 et 50 % du parc électrique en 2050 et les biocarburants se développent massivement dans **DIV**) et de gains accrus en terme d'efficacité énergétique des véhicules. Au total, la consommation finale du secteur transport baisse de 40 à 57% selon les scénarios, cette évolution se traduit par une division par trois (**SOB**) voire quatre à cinq (**DIV** et **ELE**) de la demande en produits pétroliers et une réduction de 70% (**SOB**), voire près de 80 % dans les autres scénarios des émissions de CO<sub>2</sub> fossile du transport, « du réservoir à la roue » ;

- s'agissant du secteur industriel, les scénarios ne se distinguent pas sur l'activité des branches, à l'exception d'une réduction plus marquée dans **SOB** des activités de production de clinckers et produits ferreux, et la demande d'énergie est globalement stable sur la période, les gains d'efficacité énergétique étant compensés par l'augmentation de l'activité ; en revanche, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur baissent de façon importante sous l'effet d'un report de la consommation d'énergies fossiles vers l'électricité (**ELE**), la biomasse (**DIV**) et l'utilisation de la chaleur issue majoritairement de cogénération nucléaire (**DIV**), auquel s'ajoute le recours à la capture et séquestration du CO<sub>2</sub>.

Concernant l'offre, l'évolution de la production d'électricité à l'horizon 2050 décroît très légèrement dans **DIV** et **SOB**, respectivement à 540 et 475 TWh, et augmente de près de 40% dans le scénario **ELE** (750 TWh). En revanche, dans tous les scénarios, sous l'effet de l'accroissement du recours aux énergies renouvelables variables, la capacité électrique totale installée est multipliée par un facteur 2 à 2,5 pour atteindre 210 GW (**SOB, ELEC-V**) à 275 GW (**ELE**). La réduction de la part du nucléaire se traduit par un recours accru, culminant autour de 2025, aux centrales thermiques gaz en complément des énergies renouvelables dans les scénarios **DIV** et **SOB**. Dans le scénario **ELE**, il est envisagé de recourir à des techniques de stockage massif d'électricité afin de valoriser pleinement les énergies renouvelables variables en évitant les non-utilisations, ce qui conduit à des capacités de stockage inter-saisonnier. Les différents scénarios reposent en outre sur l'hypothèse d'une pénétration rapide de l'intelligence dans les réseaux, de façon à exploiter toutes les flexibilités disponibles (gestion de la demande/effacement, conversions entre vecteurs énergétiques tels que « power to gas », stockage).

Par ailleurs, la chaleur joue un rôle important dans tous les scénarios de l'ANCRE, notamment à travers la récupération de chaleur fatale (centrales thermiques notamment nucléaire, industries) et la chaleur d'origine renouvelable. Cette chaleur est utilisée pour alimenter des réseaux urbains. Le scénario **DIV** table ainsi en 2050 sur la production d'environ 240 TWh de chaleur, produits pour moitié par des EnR, et pour moitié par cogénération nucléaire.



Les scénarios de l'ANCRE atteignent l'objectif de division par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique, **DIV** et **ELEC-V** le dépassent légèrement. En considérant l'ensemble des gaz à effet de serre, la baisse des émissions se situe entre 65 et 70% selon les scénarios. Ces performances requièrent toutefois la mise en œuvre de technologies de rupture : la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> (pour 50MtCO<sub>2</sub>), éventuellement assorti de sa valorisation par conversion en d'autres produits valorisables dans le scénario **SOB**, le stockage massif de l'énergie dans **ELE** (pour les surproductions estivales et la pointe hivernale) et la cogénération, notamment nucléaire, dans **DIV** (pour 120TWh – 80TWh dans le résidentiel-tertiaire et 40TWh dans l'industrie).

### *Evaluation des scénarios*

Une évaluation multicritère des scénarios a été menée par l'Alliance. Elle n'a pas donné lieu à un classement des scénarios, ce qui n'était pas le but assigné à l'Alliance et poserait la question très difficile de la pondération des critères et des incertitudes associées.

La majorité des travaux à la base de ce rapport a porté sur des critères technologiques et scientifiques. Sont présentés ci-après essentiellement des critères d'ordre économique. Les travaux menés par l'ANCRE en la matière pointent le déficit d'outils d'analyse et d'évaluation partagés entre les parties-prenantes et capables de prendre en compte la complexité des questions posées, notamment en matière d'impacts économiques, environnementaux ou de création et destruction d'emplois. Des propositions sont faites en conclusion pour progresser dans cette voie dans le futur.

### *Emissions de gaz à effet de serre*

Par construction, tous les scénarios atteignent le Facteur 4 en 2050, pour le CO<sub>2</sub> d'origine énergétique. Si l'on considère l'ensemble des gaz à effet de serre, les scénarios permettent une baisse de 65 à 70% de la totalité des émissions. L'enjeu principal pour réduire plus avant ces émissions de GES est celui de l'agriculture (notamment les émissions de méthane). En s'appuyant sur les travaux de l'INRA, nous avons retenu l'hypothèse d'une réduction de 50% des émissions du secteur à l'horizon 2050. En ce qui concerne la dynamique la réduction des émissions, il apparaît que le nucléaire peut être dans le moyen terme un facteur important (voir la variante **ELEC-V**). A plus long terme, le développement d'autres technologies et la maîtrise de la demande (dont le scénario **SOB**) permettent des choix plus ouverts.

### *Indépendance énergétique et commerce extérieur*

Les différents scénarios aboutissent, en 2050, à une réduction importante de la dépendance énergétique de la France qui passe de 51% aujourd'hui à 27% (**ELE**), 28% (**DIV**) ou 36% (**SOB**) en conséquence d'une baisse de la consommation en hydrocarbures. Les gains possibles en termes de réduction d'importation de produits pétroliers sont importants dans tous les scénarios. On peut aussi noter que l'exploitation de ressources nationales, comme par exemple les ressources de Guyane, pourraient jouer en faveur d'un rééquilibrage de la balance commerciale.

Au total, les importations qui seraient réduites de près de moitié dans (**ELE**) et (**DIV**) permettraient une baisse considérable de la facture pétrolière et gazière du pays (de l'ordre de la cinquantaine de milliards d'euros/an en fin de période). Cet effet macroéconomique positif et majeur doit cependant être mis en rapport avec le montant considérable des investissements mobilisés par la transition.

### *Investissements et coûts de l'énergie*

Les montants nécessaires par la transition énergétique sont de l'ordre de mille milliards d'euros d'ici à 2050. Au stade actuel, l'ANCRE n'a pas identifié d'écart très notable entre les scénarios. Par exemple, si le scénario **SOB** est très coûteux en investissements dans le résidentiel et tertiaire, il l'est moins dans les autres secteurs, notamment l'offre d'énergie où les investissements sont plus faibles car la production diminue avec la baisse de la demande. Un fort niveau d'investissement permettant de



réduire les dépenses récurrentes de consommation d'énergies fossiles est l'une des caractéristiques robustes de tous les scénarios de transition énergétique.

### *Prix des énergies*

Les prix des énergies fossiles sont dictés par les marchés extérieurs. Dans le scénario **SOB**, l'ANCRE a par ailleurs supposé des prix du carbone élevés (jusqu'à 300€/tonne en 2050 dans ce scénario), pour motiver les agents économiques à des comportements sobres. S'ensuit un prix de l'énergie plus élevé. Ainsi par exemple, le prix de l'électricité aux ménages pourrait doubler sur la période. A court terme, les coûts de production électrique seront d'autant plus élevés que le recours aux renouvelables est important. A plus long terme, ces facteurs s'estompent, notamment du fait de la baisse du coût des énergies renouvelables. Notons qu'un enjeu très important et mal connu devra être analysé avec soin : les coûts de système qui pourraient être très élevés pour les énergies renouvelables variables. Un des enjeux de la transition sera de faire graduellement baisser ces coûts, grâce aux innovations en matière de stockage et des réseaux intelligents.

### *Impact pour les ménages*

Dans tous les scénarios (surtout **SOB**), les prix de l'énergie vont augmenter significativement. Notons que des mesures compensatoires devront être prises pour en atténuer l'impact. Par ailleurs, plus la consommation est faible, et moins la facture énergétique, même si les prix sont élevés, sera importante. Comme les prix des énergies n'apparaissent pas très différents (hors CO<sub>2</sub>) entre scénarios, l'avantage ira alors au scénario (**SOB**). Toutefois, il faut pondérer ce résultat par le surcroît d'investissements nécessaire dans les logements et surtout par d'éventuels impacts sur le bien-être liés à des changements de comportements dont on ne peut toujours quantifier s'ils seront voulus ou subis.

### *Emploi*

Des calculs d'emplois directs et indirects ont été effectués pour les principaux secteurs. Au total, de multiples effets doivent être pris en compte, et il n'est pas apparu possible de déterminer l'impact net sur l'emploi, et, a fortiori, de classer les scénarios entre eux. Une raison supplémentaire qui appelle à la prudence est certainement que les effets macroéconomiques et de commerce extérieur dus aux écarts de prix induits détermineront aussi largement l'impact sur l'emploi.

En conclusion, des travaux très importants restent à mener dans ce domaine.

### *Impact sur le budget de l'état et l'économie dans son ensemble*

Ce sujet demanderait aussi de recourir à des modèles macroéconomiques pour pouvoir être traité de façon cohérente. Un résultat que l'on retrouverait alors serait un impact macroéconomique important sur le PIB, le budget de l'Etat, la consommation des ménages... Cet impact combinerait à court terme des effets keynesiens de relance avec des impacts plus négatifs sur le pouvoir d'achat des ménages ou les coûts des entreprises. En effet les scénarios impliquent des efforts importants à déployer rapidement avec des effets positifs qui ne se feront sentir pleinement qu'à plus long terme. Les conséquences des scénarios de transition sur ces horizons longs demeurent encore à explorer.

L'ANCRE ne dispose pas à ce jour de modèles adaptés et cet exercice, complexe, n'a donc pas été mené. Par contre, les données collectées et construites permettent de donner des éclairages sur les thématiques que sont les gains potentiels de la réduction de la facture énergétique, les risques de pertes de compétitivité par un investissement au-delà de la frontière d'efficacité, la question des modalités de financement et la question du poids sur les finances publiques des dispositifs d'incitation.



## *Impacts environnementaux*

Dans l'ensemble des scénarios les impacts seraient assez voisins. Le scénario **DIV**, qui suppose un recours accru à la biomasse est construit sur l'hypothèse de solde du commerce extérieur de biomasse énergétique neutre et d'absence de bouleversement des pratiques culturales. Les surfaces concernées par les cultures mobilisables pour l'énergie (à croissance rapide ou non) seraient de l'ordre de 5 Mha, soit environ 10% du territoire. L'emprise au sol des énergies solaires et éoliennes serait importante dans les scénarios de développement de l'électricité (en particulier **ELE**, mais tous les scénarios sont concernés), pouvant représenter près de 850 km<sup>2</sup> pour 60 GW de solaire et 550 km<sup>2</sup> pour 57 GW d'éolien on-shore. Mais ce résultat doit être considéré avec prudence car un meilleur usage des surfaces artificialisées permettrait de satisfaire une part importante des besoins. Le développement de l'éolien en mer permettrait également de déporter les impacts dans des zones inhabitées.

## *Autres impacts*

L'ANCRE cherche à analyser également des impacts d'autres natures, tels que les risques accidentels, l'impact sur la santé, la perception sociale des évolutions technologiques et des contraintes économiques et réglementaires, la « faisabilité politique » des trajectoires... L'évaluation poussée des scénarios ne pourra être menée qu'après des réflexions interdisciplinaires d'une certaine ampleur. Un rapprochement avec l'Alliance ATHENA est mené dans ce but.

## *Principales conclusions*

Le travail accompli par l'ANCRE montre que si l'atteinte du Facteur 4 (pour le CO<sub>2</sub> énergétique) est possible, elle nécessitera, quel que soit le scénario, des efforts importants dans au moins trois directions : les comportements (avec des politiques adaptées de réglementation, de prix de l'énergie et d'information du consommateur), la prise en compte du rapport coût-performance des technologies mobilisées, le développement d'infrastructures et d'aménagements. La réalisation de ces conditions suppose des investissements considérables.

L'ANCRE rappelle que toutes les analyses indiquent que l'atteinte du Facteur 4 ne se fera pas sans une politique européenne de l'énergie visant à organiser les complémentarités et la cohérence d'ensemble ; cela s'applique non seulement aux politiques en matière d'industries de réseaux, électricité et gaz, mais aussi aux programmes de R&D.

Les conséquences macroéconomiques dépendront très largement de la capacité à mettre en œuvre, au plan national et européen, des politiques coordonnées en matière de recherche et développement, de fiscalité notamment environnementale, et de soutien au déploiement de filières industrielles compétitives. A côté des verrous technologiques devront être levés les freins liés au passage vers un nouveau système énergétique, moins centralisé, laissant davantage de marge de manœuvre (et de responsabilité) aux territoires et autres parties prenantes.

En matière de R&D, les efforts devront être soutenus :

- i. dans les différents segments-clés de l'efficacité énergétique et de la maîtrise de la demande ;
- ii. du côté de l'offre avec la création de filières énergies renouvelables, mais également le maintien de l'avance des filières matures, en particulier dans le nucléaire et les hydrocarbures ;
- iii. de l'optimisation des systèmes énergétiques vers davantage d'intelligence et de flexibilité par la diffusion de technologies de l'information et de la communication, le développement de technologies pour le stockage de l'énergie et les conversions entre ces vecteurs ;
- iv. dans le domaine de la capture, du stockage et de la valorisation du CO<sub>2</sub> ;
- v. dans le domaine des SHS pour accompagner la transition.



Ainsi, l'effort public en matière de R&D dans l'énergie doit rester soutenu afin de faire face à l'ensemble des enjeux de la transition énergétique et de répondre à la demande sociale. Actuellement, les dépenses de R&D dans l'énergie en France sont inférieures à 2 milliards d'euros/an.

Par rapport à l'investissement nécessaire à la transition, ces dépenses de R&D, si elles restaient stables, représenteraient quelques pour cent du total. Il faudra veiller à ce que la recherche française ait les moyens de rester performante et attractive, en liaison avec le secteur privé mais également avec des partenaires étrangers, notamment européens. A cet égard, l'ANCRE a, dans le cadre de sa contribution à l'élaboration de la stratégie nationale de recherche, mis en avant un certain nombre de recommandations<sup>3</sup>.

Le besoin de politiques stables et prévisibles est important, tant pour les industriels que pour les organismes de recherches. Les choix de R&D assurant le développement de chaque technologie doivent observer un juste équilibre entre continuité dans le soutien et capacité de réviser les choix lorsque cela est nécessaire, sans céder aux effets de mode.

L'ANCRE est prête à jouer un rôle important dans le suivi de la transition énergétique, pour l'accompagner au mieux par une R&D programmée et efficace, au service de l'industrie nationale et de l'emploi. Des propositions en ce sens sont faites dans le rapport.

---

<sup>3</sup> Disponible à l'adresse suivante : <http://allianceenergie.fr/contribution-de-l-ancre-a-l-elaboration-d-une-strategie-nationale-de-recherche-pour-l-energie.asp>



## Introduction

Dans le cadre de la préparation de la loi sur la transition énergétique et du débat lancé à l'automne 2012, il est apparu nécessaire de mettre à la disposition des parties prenantes des outils permettant d'appréhender les implications des différentes options en matière de trajectoires énergétiques pour la France. De nombreux travaux, notamment de scénarisation, émanant d'une grande diversité d'acteurs (organisations professionnelles, organisations non gouvernementales, organismes publics...), ont ainsi été versés au débat national.

**L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE)**, qui rassemble l'ensemble des organismes publics français de recherche touchant à l'énergie, a souhaité apporter sa contribution aux réflexions engagées en donnant un éclairage – correspondant à son expertise en matière de recherche, de développement technologique et d'innovation – sur les **barrières notamment technologiques à surmonter** pour atteindre les objectifs de réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre. Le but était en outre d'évaluer les conditions nécessaires et les impacts de différentes trajectoires susceptibles d'atteindre cet objectif, cette approche visant à éclairer les choix sur la base de critères d'efficacité tant sur le plan de la politique énergétique que sur celui de la dynamique économique et industrielle française.

Dérivant du scénario de référence "France" élaboré dans le cadre du travail mené pour la Direction Générale de l'Énergie et du Climat en 2010<sup>4</sup>, les trois scénarios construits par l'ANCRE répondent aux grands objectifs structurels rappelés par le gouvernement lors de la Conférence environnementale des 14 et 15 septembre dernier : "Faire de la France la nation de l'excellence environnementale, engager la France dans la transition énergétique, promouvoir l'efficacité et la sobriété, ainsi que sur le développement des énergies renouvelables, et plus globalement dans la transition écologique".

Il s'agit notamment d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre que défendra la France dans les prochaines discussions au sein des instances européennes : une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % à l'horizon 2030 et de 60 % à l'horizon 2040, en vue du Facteur 4, division par quatre des émissions en 2050 par rapport à 1990. L'ANCRE s'est donc attachée à définir des scénarios destinés à étudier les conditions dans lesquelles pourraient être respectés :

- **l'objectif d'atteinte d'un Facteur 4 de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie**, en cohérence avec l'engagement international de notre pays qui dépend encore à hauteur de 66% des combustibles fossiles importés pour sa consommation finale d'énergie, ces importations contribuant pour près de 70 milliards d'euros au déséquilibre de la balance commerciale en 2012 ;
- l'hypothèse du Gouvernement d'une **réduction de la part du nucléaire** dans la production électrique nationale, de plus de 75% actuellement à 50% à l'horizon 2025.

La réalisation de ce travail, piloté par Nathalie Alazard-Toux (IFPEN), Patrick Criqui (CNRS) et Jean-Guy Devezeaux de Lavergne (CEA), s'est largement appuyée sur les dix groupes programmatiques de l'ANCRE, dont les compétences sectorielles (filiales de production d'énergie, secteurs de consommation) ou transverses (réseaux et stockage, économie et prospective énergétique) permettent de rassembler les experts des organismes publics français et des entreprises du secteur énergétique.

---

<sup>4</sup> Rapport final ENERDATA avril 2011 et synthèse DGEC Juillet 2011



Les experts de l'ANCRE se sont donc efforcés d'analyser dans un premier temps l'évolution de la demande d'énergie par secteur, sur la base d'hypothèses moyennes de croissance économique et démographique<sup>5</sup> et d'évaluer les gains atteignables grâce à des efforts de sobriété et d'efficacité énergétique raisonnables. Cela compte-tenu de l'évolution, d'une part, des besoins et comportements et d'autre part, des gains attendus notamment de développements technologiques et organisationnels.

Ils se sont ensuite attachés à caractériser trois trajectoires d'évolution des bouquets énergétiques répondant aux éléments de cadrage en matière de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la part du nucléaire dans la production d'électricité, en tenant compte des possibilités techniques de substitution vers les énergies bas-carbone. Chacun des scénarios a mis en évidence la nécessité de ruptures technologiques pour atteindre le Facteur 4 pour les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie. L'ANCRE a ainsi pu introduire dans ses scénarios un ensemble de changements et d'innovations technologiques clairement explicités et documentés.

Les scénarios reposent sur des options contrastées et ne prétendent pas refléter l'ensemble des futurs possibles, mais plutôt illustrer les impacts des grandes orientations retenues ; ainsi, le scénario « Sobriété renforcée » montre que le choix de cette voie implique des ruptures importantes dans l'évolution des modes de vie, celui de la « Décarbonation par l'électricité » impose un investissement lourd en infrastructures, tant pour la production d'électricité nouvelle (essentiellement renouvelable) que pour son utilisation par des véhicules électriques ou à hydrogène, enfin le scénario « Vecteurs diversifiés » impose de structurer différentes filières pour la production de la biomasse et son utilisation, comme de développer d'importantes infrastructures de réseaux énergétiques diversifiés, pour la distribution de chaleur en particulier.

L'ANCRE tient par ailleurs à souligner que **les scénarios proposés reposent sur une véritable rupture en matière d'évolution de la demande** puisque les niveaux de consommation d'énergie primaire par habitant auxquels ils aboutissent en 2050 correspondent à ceux qui prévalaient à la fin des années 1960.

Une première phase de travail s'est achevée en avril 2013 et a permis de conclure que, tout en étant extrêmement ambitieux, les objectifs fixés en termes de division par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie sont atteignables sous certaines conditions. Néanmoins, face à l'exigence de ces conditions – notamment un rythme très soutenu de déploiement de moyens financiers et de nouvelles technologies, dont certaines de rupture – et aux impacts potentiels pour l'économie française, l'Alliance a élaboré une variante, dite « ELEC-V » qui, tablant sur un développement significatif de ce vecteur, vise à assouplir la contrainte en matière de part du nucléaire en 2025, tout en développant les énergies renouvelables.

Dans une seconde phase, et sur la base des échanges entre les experts de l'ANCRE et des tiers, parties-prenantes au DNTE, les scénarios ont fait l'objet d'ajustements destinés à affiner les estimations, en particulier, en matière de demande dans les secteurs des transports et de l'industrie et d'émissions de gaz à effet de serre énergétiques. Enfin, pour chacun des scénarios, l'ANCRE, toujours en s'appuyant sur l'expertise de ses groupes programmatiques, s'est engagée dans l'évaluation :

- des conditions nécessaires à leur réalisation en matière de développement technologique et d'innovation, de politique d'accompagnement, etc. ;
- de leurs impacts économiques, sociaux et environnementaux.

---

<sup>5</sup> Les hypothèses retenues sont celles du scénario volontariste DGEC/Enerdata dit « AMSO »



Ce rapport, après avoir rappelé les principaux déterminants socio-économiques de la demande d'énergie et des leviers de décarbonation du système énergétique, présente chacune des hypothèses ayant présidé à la construction des scénarios et à la caractérisation de leurs résultats. Il rassemble également – bien que les travaux soient appelés à se poursuivre – les premiers résultats des évaluations de chacun des scénarios sur la base d'une batterie de critères couvrant les aspects **économiques** (coûts de production des différentes filières, balance commerciale, trajectoire d'investissement), **environnementaux, politiques et stratégiques** (indépendance énergétique, emprise sur les sols...) enfin, **scientifiques et technologiques** (maturité des technologies, besoins de R&D...).

## L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

Créée en 2009 à l'initiative des pouvoirs publics, **l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE)** a vocation à favoriser la pertinence de la programmation scientifique et sa cohérence, en particulier à travers la recherche de partenariats et de synergies entre organismes publics de recherche, acteurs académiques et industriels et une vision partagée des verrous scientifiques, technologiques, économiques et sociétaux qui entravent les développements industriels dans le domaine de l'énergie.

L'Alliance rassemble aujourd'hui, autour des quatre membres fondateurs (CEA, CNRS, CPU et IFPEN) représentés dans son comité de coordination, les 19 organismes publics de recherche concernés par l'énergie.

Ses travaux sont conduits au sein de 10 groupes programmatiques à compétence :

- sectorielle en matière de demande (Transport, Résidentiel-Tertiaire, Agriculture et industrie),
- en matière de filières de production d'énergie (Biomasse, Fossiles, géothermie et métaux stratégiques, Nucléaire, Solaire, Eolien et énergies marines),
- transverse (Réseaux et stockage, Socio-économie et prospective énergétique).



## 1. Comprendre le système énergétique

### 1.1. Les déterminants de la demande d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur

La consommation finale d'énergie se répartit entre quatre grands secteurs : le résidentiel-tertiaire (45% de l'énergie finale consommée), les transports (31%), l'industrie (21%) et enfin l'agriculture (3%).

#### 1.1.1. Résidentiel-Tertiaire

Avec une consommation de 68 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), le secteur résidentiel-tertiaire représente en 2012 en France 45% de l'énergie finale consommée et 25% des émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'énergie. Corrigées des variations climatiques annuelles, sa consommation d'énergie finale a augmenté d'un peu plus de 15% entre 1990 et 2010, tandis que les émissions du secteur sont restées relativement stables (en légèrement augmentation de 3%).

La forte croissance du parc sur la période (le nombre de résidences principales a augmenté d'environ 30% et les surfaces tertiaires chauffées de près de 40%) a en effet été partiellement contrebalancée par un accroissement de l'efficacité énergétique des bâtiments (nouveaux logements de mieux en mieux isolés, amélioration continue du parc existant) et par des substitutions vers des énergies moins émettrices de CO<sub>2</sub> (gaz et électricité ont pris des parts croissantes au détriment du fioul et du charbon).

Les principaux déterminants de la consommation d'énergie et des émissions dans le secteur sont :

- **le rythme d'évolution du volume du parc de bâtiments.** Le secteur se caractérise par un renouvellement très lent. Le taux de construction neuve est de l'ordre de 1%/an, directement lié à la croissance démographique, tandis que le taux de destruction est extrêmement faible, de l'ordre de 0,1 à 0,3% par an. En prolongeant les tendances actuelles (fécondité, solde migratoire, mortalité, décohabitation), les projections de l'INSEE estiment la croissance du nombre de ménages à 200 000 par an en moyenne d'ici 2050 et à 235 000 par an d'ici 2030. Compte tenu d'hypothèses sur le taux de logements vacants et la résorption du mal-logement maintenus au même ordre de grandeur qu'aujourd'hui, la demande potentielle de logements neufs est estimée entre 300 000 et 400 000 par an en moyenne d'ici 2030. Ainsi, entre 60% et 70% du parc de 2050 est-il déjà construit en 2010. Quelles que soient les performances des constructions neuves, une baisse sensible des émissions du parc à l'horizon 2050 passe donc par un traitement en profondeur du parc existant.

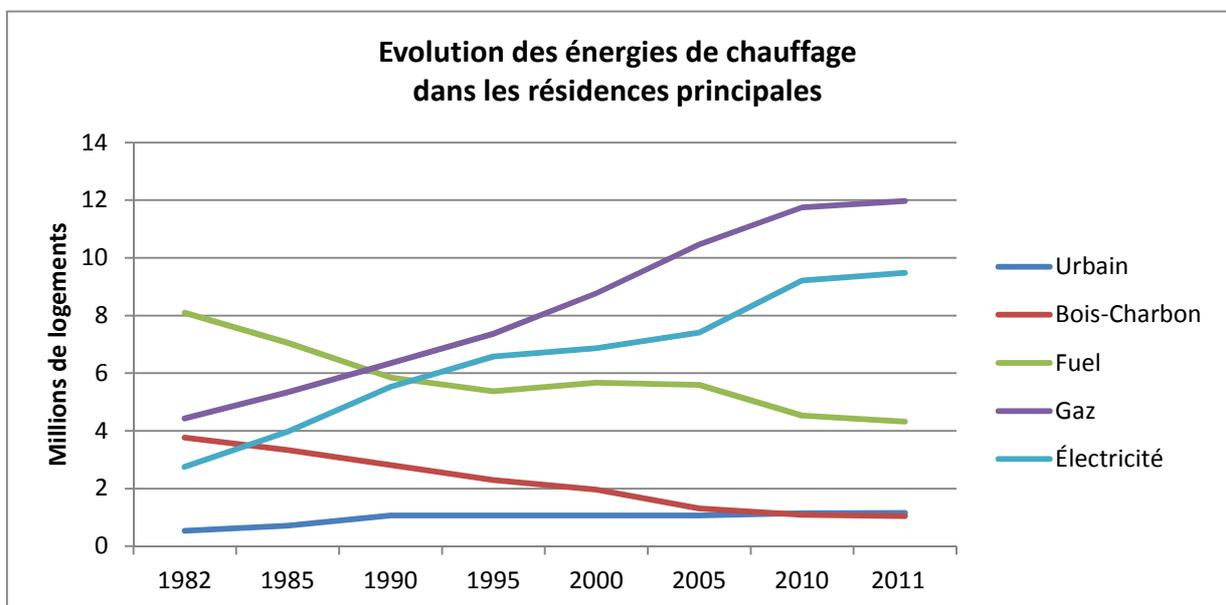
- **la destination ou l'usage des bâtiments.** Le parc de bâtiments se caractérise par une grande hétérogénéité. Les logements représentent environ les trois-quarts des surfaces – 2,5 milliards de m<sup>2</sup> pour les résidences principales (dont 2/3 pour les maisons individuelles) – et le tertiaire un quart des surfaces – 920 millions de m<sup>2</sup>. Les intensités d'usage énergétique varient fortement entre ces catégories : la consommation unitaire d'un logement est en moyenne de 190 kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup> contre 245 kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup> dans le tertiaire ; les usages thermiques (chauffage et eau chaude) représentent près de 80% de la consommation d'énergie dans les logements contre moins de 50% dans le tertiaire, où les usages spécifiques de l'électricité sont beaucoup plus importants. Par ailleurs, entre les branches du tertiaire, les différences peuvent être encore plus marquées : en moyenne, les établissements d'hôtellerie-restauration ont une consommation unitaire 2,7 fois plus élevée que celle des établissements d'enseignement.



- **les caractéristiques techniques des enveloppes de bâtiments.** L'année de construction est un des paramètres fondamentaux. 55% des logements de 2010 ont été construits avant 1975, donc avant toute réglementation thermique (RT) s'imposant aux logements neufs ; dans le tertiaire, 70% du parc date d'avant 1988, date de la première RT tertiaire. Néanmoins, les efforts de rénovation déjà réalisés sur le parc ancien ont fait baisser les consommations de chauffage dans ce parc. La problématique de la maîtrise des consommations d'énergie se déplacera donc lentement de l'usage chauffage (qui reste aujourd'hui largement prédominant) vers d'autres usages (l'électricité spécifique notamment), dont la consommation augmente rapidement.

- **les comportements et les choix des ménages et agents économiques** impactent également la consommation d'énergie du secteur. Les tendances historiques sont à l'augmentation des surfaces des logements, passées en moyenne de 81 m<sup>2</sup> à 85 m<sup>2</sup> entre 1999 et 2012, les maisons individuelles gagnant même 6 m<sup>2</sup> sur la période (induisant par là-même une augmentation des surfaces à chauffer), et à l'augmentation des températures de confort. L'augmentation de richesse, la tendance à la décohabitation et le vieillissement de la population devraient prolonger ces effets dans le futur. Par ailleurs, la demande d'électricité liée aux usages spécifique croît – de l'ordre de + 2,3 %/an en moyenne entre 1997 et 2012 – prenant une part croissante dans la demande d'énergie du secteur et tirant cette énergie à la hausse.

- **la pénétration des systèmes de chauffage et des énergies.** Avec le développement du programme nucléaire dans les années 1970-80 et du réseau de gaz naturel, électricité et gaz ont pris une place croissante comme énergie de chauffage (cf. le graphique suivant qui montre l'évolution des énergies de chauffage dans le parc de résidences principales). Au contraire, le charbon a presque disparu et le fuel perd régulièrement des parts de marché.



Dans ce secteur, les scénarios Facteur 4 à l'horizon 2050 consistent, de façon schématique :

- à réussir la construction de bâtiments neufs très efficaces ;
- à réhabiliter en profondeur une grande partie du parc existant ;
- à privilégier les vecteurs énergétiques décarbonés.



Que ce soit pour construire ces bâtiments neufs passifs ou pour rénover le parc existant, la contrainte majeure est moins technologique (isolants minces, pompes à chaleur, éco-quartiers, etc.) qu'économique, organisationnelle et comportementale. Plus particulièrement, accroître très fortement le rythme des travaux de rénovation du parc pose un double problème économique (mode de financement, rentabilité des projets, disponibilité des capitaux, etc.) et de compétences dans la filière construction. Au-delà, il faut également s'assurer que les gains d'efficacité des bâtiments ne sont pas annulés par un relâchement des comportements des occupants, habituellement qualifiés d'effet-rebond.

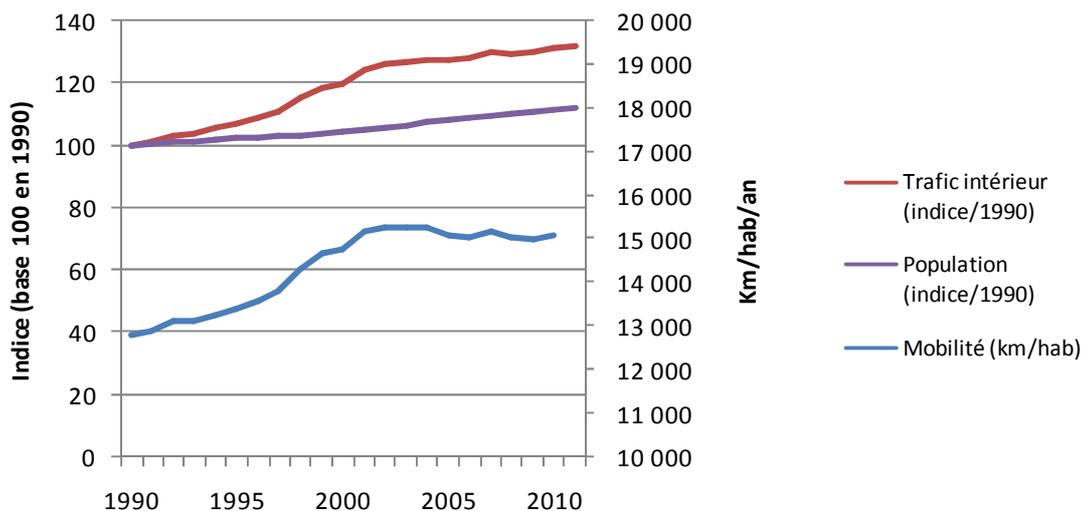
Par ailleurs, les ménages en précarité énergétique nécessitent un accompagnement spécifique, compte tenu de leur faible capacité à investir dans des actions d'efficacité énergétique. Par exemple, le programme Habiter mieux, porté par l'ANAH, offre aux ménages modestes les moyens d'améliorer sensiblement la qualité thermique de leur logement et de réduire durablement leur facture énergétique.

## 1.1.2. Transport

La consommation d'énergie finale liée au secteur transport est évaluée en 2012 à 49 Mtep, soit 31 % de la consommation finale totale, derrière le résidentiel-tertiaire. Mais ce secteur, très dépendant des hydrocarbures fossiles sur le plan énergétique, est le premier contributeur en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> avec 138 Mt émises en 2012, soit 40 % du total des émissions nationales de CO<sub>2</sub>. Cette part a régulièrement augmenté depuis 1990, passant de 33 à 40 %. Pour comprendre les principaux déterminants de la demande d'énergie et des émissions du transport, il convient de distinguer : le transport de personne et le transport de marchandises.

### *Transport de personnes*

La demande de transport de passagers croît depuis 1990 à un rythme annuel supérieur à celui de la population (respectivement 1,3% et 0,5%) et atteignait, en 2012, 985 milliards de pkm (passagers.kilomètres, unité permettant de mesurer la mobilité des personnes). On remarque cependant depuis les années 2000 une stabilisation de la mobilité des personnes à environ 15 000 km/an/hab.



Au sein de la demande de transport de passagers, on peut également distinguer :

- la mobilité courte distance (<80km)
- la mobilité longue distance (>80km).



La courte distance représente 60% de la mobilité exprimée en pkm (Enquête nationale transports et déplacements 2008) et est principalement motivée par les déplacements domicile-travail (plus de 40% de la mobilité locale). La mobilité longue distance est quant à elle principalement liée à des déplacements personnels, 80% de la mobilité longue distance (35% visites proches, 23% vacances, 12% pour les loisirs), les motifs professionnels représentant les 20% restants (13% de déplacements et 7% de trajets domicile-travail >80km).

Lors d'un déplacement le choix du mode est fonction :

- de la disponibilité des différents modes ;
- du temps de parcours ;
- du coût.

Ainsi, la voiture particulière reste le mode préféré du fait de son caractère de disponibilité. Elle représente plus de 80% de la mobilité au niveau national mais cette part diminue et passe à seulement 12% à Paris, où les réseaux de transports collectifs sont fortement développés et la congestion importante dissuade l'utilisation de la voiture.

Depuis 1990, l'impact de l'augmentation du transport de personnes (+30%) sur la consommation d'énergie a été partiellement compensé par une amélioration de l'efficacité énergétique des transports routiers de personne d'environ 15% (CCFA d'après MEDDE/SOeS), et ce malgré l'inertie du renouvellement du stock de véhicules particuliers.

### *Transport de marchandises*

La demande de transport de marchandises est une demande dérivée de l'activité d'autres secteurs ayant besoin de transporter leur production vers les sites de consommation intermédiaire ou finale. La demande de transport de marchandises dépend :

- de la consommation des ménages et du caractère matériel ou immatériel du produit ou service consommé ;
- du niveau d'activité des industries (consommation intermédiaire).

La demande de transport de marchandise a crû depuis 1990 à un rythme soutenu (+2,6%/an) et proche de celui du PIB (+2,4%) pour atteindre 350 milliards de tkm (tonnes.kilomètres, unité permettant de mesurer la mobilité des marchandises), en 2010.

La demande d'énergie associée au transport de marchandises est liée au volume transporté mais aussi à l'efficacité énergétique du mode de transport. La route est la principale solution utilisée et représentait, en 2010, plus de 80% de la demande de transport de marchandises, même si son efficacité énergétique est la plus faible (26 à 120 tep/Mtkm contre 5 tep/Mtkm pour le fer et 12 tep/Mtkm pour le transport fluvial, selon l'ADEME en 2006). Le rail et les voies d'eau sont des solutions complémentaires et représentent respectivement 8% et 2% de l'activité de transport de marchandise exprimée en tkm.

Depuis 1990, l'effort de réduction de 20% de l'intensité énergétique du transport routier a permis de limiter les effets sur la consommation énergétique d'une augmentation de 70% des tkm par voie routière. Ainsi la consommation d'énergie n'a augmenté que d'environ 40% sur la période.



## *Leviers pour décarboner les transports*

Plus de 90% des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur transport (hors transport aérien international et transport maritime international) sont liées à la route avec environ 72% pour les véhicules légers (véhicules particuliers – VP – et véhicules utilitaires légers – VUL) et 22% pour les poids lourds (PL).

Pour réduire ces émissions les leviers d'action sont les suivants :

- **la demande de transport** ; une réduction de celle-ci via par exemple le développement du télétravail ou un rapprochement des sites de production et de consommation impacte directement la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> ;
- **les modes de transport**, en favorisant les modes à plus faible intensité carbone (transports en communs, rail, modes doux) ;
- **l'efficacité énergétique des modes de transports**, en améliorant par exemple la consommation unitaire des véhicules ou en optimisant via les technologies de l'information et de la communication le trafic ;
- **les vecteurs énergétiques**, en développant des vecteurs à faible contenu carbone du puits à la roue (biocarburants, électricité, H<sub>2</sub>).

### **1.1.3. Industrie**

Le secteur de l'industrie comprend, pour la comptabilité nationale, les industries telles que l'agroalimentaire, la sidérurgie, le bâtiment et le génie civil, mais ne comprend pas ce qui relève de la production et de la transformation d'énergie (centrales électriques, cokeries, raffineries, pertes de distribution, etc.). Des progrès déjà considérables ont été obtenus depuis les chocs pétroliers en matière d'intensité énergétique de l'industrie : une baisse de plusieurs dizaines de pour cent de la consommation a ainsi été observée depuis 20 ans. Les grandes industries se sont pour l'essentiel organisées pour maîtriser leur consommation d'énergie.

Par contre, l'analyse des technologies disponibles pour chaque industriel, comparées aux pratiques effectives, montre que des gisements significatifs restent encore à mettre en œuvre, alors même que les conditions économiques semblent réunies (temps de retour). Cet état de fait témoigne de la difficulté à réduire les questions d'investissement ou d'organisation du travail aux seuls aspects énergétiques, ainsi que les faibles marges de manœuvres de nombre d'industriels, notamment en matière d'accès au capital. Enfin, il convient de rappeler l'importance de la mise à la disposition des industriels des meilleures technologies, et du fait de les relier à des capacités d'innovation leur permettant de développer en circuit court des procédés performants.

La consommation énergétique de l'industrie est évidemment très dépendante de l'activité économique du pays, et parfois, pour certains secteurs, de l'activité d'un nombre très restreint d'entreprises, dites IGCE (Industries Grosses Consommatrices d'Énergie). Par exemple, en 2009, suite à la crise économique, elle a fortement chuté à 33,0 Mtep (- 12,9 %). Après une remontée en 2010 (+ 2,9 %), la consommation finale de l'industrie recule à nouveau depuis 2011. Elle est ainsi aujourd'hui proche de son plus bas niveau depuis 1970.

L'évolution de la production physique de l'industrie est très dépendante de la ligne directrice du scénario (sobriété ou non) et de ses hypothèses exogènes (croissance du PIB, etc.). Les leviers pour faire baisser la consommation énergétique fossile tout en maintenant une industrie performante se situent alors au niveau de l'efficacité énergétique et de l'intégration de nouvelles sources d'énergies (valorisation de chaleur fatale, solaire thermiques, etc.). Par ailleurs, l'industrie est aussi



consommatrice de produits énergétiques à usages non énergétiques, pour la production d'engrais ou de matières plastiques par exemple.

#### **1.1.4. Agriculture, Sylviculture et mobilisation de la biomasse**

Ce secteur a la particularité d'être faiblement demandeur d'énergie (moins de 5 Mtep) mais grand producteur d'énergie (biomasses forestière et agricole). La consommation d'énergie du secteur recouvre notamment la consommation des tracteurs, des serres et des bâtiments à usage agricole.

Un double mouvement caractérise la consommation énergétique du secteur : une baisse possible liée à l'introduction de matériels moins énergivores et/ou utilisant des énergies bas carbone, à l'optimisation des systèmes logistiques permettant de réduire le transport et d'aller vers le multimodal et la massification, aux systèmes de cultures innovants permettant de réduire les intrants ; une hausse liée au développement attendu de l'offre en biomasse pour répondre aux besoins, en particulier l'énergie.

L'agriculture est par ailleurs un secteur peu émetteur de CO<sub>2</sub>, mais fortement émetteur d'autres GES (20% des émissions de GES françaises environ), notamment pour le N<sub>2</sub>O (engrais) et de CH<sub>4</sub> (bétail).

### **1.2. Offre, équilibre des systèmes énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub>**

#### **1.2.1. Les sources d'énergie**

Le système énergétique français se caractérise par le rôle encore très important joué par les hydrocarbures dans l'approvisionnement total : en 2012, pétrole et gaz représentaient 79 et 38 Mtep pour une consommation d'énergie primaire de 259 Mtep, soit respectivement 30 et 15%.

Le solde importateur, pour ces seules énergies, représente en 2012 près de 70 milliards d'euros, soit l'équivalent du déficit commercial de la France. L'énergie nucléaire joue également un rôle majeur dans l'approvisionnement avec 111 Mtep soit 43% de l'énergie primaire totale et 75% de la production d'électricité. Si l'on tient compte de la part de 22% de l'électricité dans la consommation finale, la contribution de l'énergie nucléaire à cette consommation finale est cependant ramenée à 17%. Les énergies renouvelables, aujourd'hui essentiellement biomasse et hydraulique, ne représentent encore que 23 Mtep en énergie primaire.

##### ***a) L'énergie nucléaire***

Aujourd'hui l'énergie nucléaire qui subvient aux trois-quarts de la demande en électricité, assure dans ce domaine une relative indépendance de la France. Elle contribue également fortement au faible contenu en carbone du kWh produit et consommé sur le territoire national : 6 g de CO<sub>2</sub>/kWh. Le parc nucléaire actuel représente une puissance installée de 63 GWe et se caractérise par un coût complet de production de l'électricité très bas, qui explique en grande partie que le prix hors-taxé de l'électricité en France soit un des plus compétitifs d'Europe.

Néanmoins, dans les exercices de prospective et les réflexions menées ces dernières années sur l'évolution du secteur national de l'énergie à long terme, la question d'un maintien d'une part élevée du nucléaire dans le mix électrique est régulièrement posée. Le parc nucléaire français a pour près de



80 % été construit dans les années 70 et 80, et un tiers de la puissance installée a plus de 30 ans. De plus, la catastrophe de Fukushima en 2011 a ravivé les craintes et débats autour du risque nucléaire.

Dès le début de son mandat, le Président de la République a d'ailleurs défini un cadre en fixant comme objectif la réduction à 50 % de la part du nucléaire dans la production nationale d'électricité à l'horizon 2025.

Les trajectoires étudiées par l'ANCRE dans le cadre du débat sur la Transition Énergétique cherchent à respecter ce cadre, en faisant l'hypothèse d'une fermeture progressive des centrales de plus de 40 ans et d'une augmentation régulière des énergies renouvelables dans la production d'électricité. Elles cherchent également à identifier les technologies à développer afin de permettre la substitution d'une production d'énergie primaire nucléaire pouvant assurer une base régulière, par une énergie primaire décarbonée d'origine renouvelable, en grande partie variable.

Le pays n'ayant pas fait le choix d'une sortie totale du nucléaire, les trajectoires proposées par l'ANCRE n'écartent pas la solution nucléaire qui reste une solution d'intérêt dans un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'accroissement de l'indépendance énergétique et d'optimisation de la facture énergétique globale.

### ***b) Les énergies fossiles (dont gaz et huiles de roches mères)***

Si la part des combustibles fossiles dans la demande d'énergie primaire a plutôt eu tendance à diminuer au cours des dix dernières années, elle représente encore près de la moitié de la demande globale. Le pétrole est la première source appelée avec 79 Mtep, suivi du gaz naturel avec 38 Mtep, la consommation nationale de charbon en baisse constante depuis 40 ans, se limitant en 2012 à 10,9 Mtep.

Les combustibles fossiles sont responsables de l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre du pays et contribuent également à un taux de dépendance énergétique supérieur à 50 %. La production nationale de pétrole, gaz, charbon reste en effet très faible : moins de 2 Mtep sont produits aujourd'hui par la France et le pays dépend très fortement d'importations en provenance de régions situées en dehors des frontières européennes.

Les scénarios envisagés dans le cadre d'une transition énergétique qui vise à diviser par quatre les émissions de CO<sub>2</sub> à 40 ans et à accroître le niveau d'indépendance du pays, privilégient les solutions allant dans le sens d'une baisse très forte de la consommation de combustibles fossiles et notamment de pétrole. C'est la contrainte première établie par l'ANCRE pour la construction des scénarios. Mais réduire la part des hydrocarbures à zéro semble aujourd'hui difficile même à l'horizon 2050. Dans ce contexte, étudier les possibilités de développement d'une production domestique économiquement et environnementalement acceptable, qui permettrait de diminuer les volumes restant à importer, demeure intéressant, surtout dans un contexte international qui privilégie la perspective d'une multiplication par 2 ou 3 d'ici 2050 du prix du pétrole.

Il est important de rappeler que le pays dispose potentiellement (car elles restent à évaluer) de ressources en mer avec la Guyane ou à terre avec les hydrocarbures de roche-mère. Les ressources récupérables de pétrole de roche-mère du seul bassin parisien sont chiffrées dans le rapport de l'OPECST entre 1 et 6,4 milliards de barils.



## **c) Les EnR : biomasse, éolien, solaire, énergies marines, géothermie, déchets**

### **i. Biomasse**

En 2010, la consommation française de biomasse était de 10,1 Mtep, pour 70% du bois et 25% des biocarburants.

La France est fortement dotée en potentiels de biomasse, notamment forestière. Outre la « biomasse primaire » (forêt, cultures agricoles), certains déchets font partie du potentiel de ressources biomasse avec une valorisation énergétique multiple (chaleur, électricité, biocarburants 2G...) comme les déchets de bois en fin de vie et les « connexes et sous-produits » (connexes de scierie, liqueurs noires, pailles), ou une valorisation par le biais de la méthanisation (déchets de l'élevage, ordures ménagères, déchets organiques des industries agroalimentaires, déchets de restauration, déchets aquacoles, déchets de culture des fruits et légumes).

Beaucoup de questions se posent sur la disponibilité réelle de ces ressources et sur leurs coûts de mobilisation. Les évaluations peuvent diverger selon les potentiels pris en compte, les hypothèses retenues, les coefficients de conversion pris... ; mais la plupart convergent sur plusieurs points :

- La demande en bioénergies et les demandes traditionnelles (valorisation matière) orientent le secteur biomasse, i.e. son comportement d'offre et donc sa demande énergétique associée.
- Ces demandes énergétiques sont en priorité satisfaites par la ressource nationale ; c'est un choix de développement auto-centré qui se fonde sur l'existence d'un « potentiel national additionnel disponible » et sur le fait que les projets biomasse sont adossés à des territoires.

Pour certaines biomasses, le signal-prix n'est pas la variable structurante. Les ruptures sont dans un premier temps plus d'ordre sociétal (rendre plus élastique l'offre de bois, développer des cultures énergétiques dédiées, engager des projets de territoires) que technique.

On peut toutefois considérer qu'un accroissement du potentiel techniquement récoltable, en particulier forestier, demandera une rupture technologique (utilisation généralisée de techniques encore expérimentales comme le Lidar terrestre ou aérien ; nouvelles techniques d'exploitation forestière en zones de montagne...). Des ruptures de ce type ne sont pas envisagées dans l'agriculture, mais seront nécessaires pour la filière des biocarburants de deuxième génération (optimiser les souches et développer des procédés adaptés). Le rôle des biomasses de troisième génération (algues, ressources marines, etc.) sera d'autant plus important que les objectifs assignés seront hauts : c'est une variable d'ajustement permettant de relâcher les attentes sur les autres biomasses.

Au final, les déterminants de la demande et de l'offre du secteur « Agriculture, Sylviculture et mobilisation de la biomasse » devront intégrer un mix d'incitations : signal-prix, fiscalité, réglementation, innovations technologiques et organisationnelles, en rupture ou non. L'une des ruptures majeures à attendre porte sur une gouvernance qui permettrait d'établir des projets de territoire fondés sur un développement durable. Ceci demandera *de facto* une articulation des mesures de l'offre et de la demande de biomasses. Sans cette condition (changement organisationnel), les objectifs liés aux biomasses domestiques dans la transition énergétique ne seront pas tenus.

### **ii. Eolien**

En 2010, la France a produit 0,8Mtep (9TWh) d'électricité d'origine éolienne pour environ 6 GW de puissance installée, exclusivement on-shore.



L'éolien terrestre représente près de 80% de l'objectif fixé pour l'énergie éolienne dans le cadre du Grenelle, soit 19 GW à l'horizon 2020, auquel doit être ajouté un objectif de 6 GW pour l'éolien off-shore. L'on-shore se distingue de l'off-shore par la maturité de la filière et par des coûts de production largement inférieurs.

Si les perspectives de déploiement, au niveau français, comme au niveau mondial, sont très prometteuses, l'année 2011 s'est caractérisée par une contraction du marché, après des années de hausse à deux chiffres, sous l'effet conjugué de la crise, de changements réglementaires et de difficultés d'acceptabilité locale. Le développement de cette filière représente un enjeu important en matière d'emploi. Les verrous à lever concernent, outre la question de l'acceptabilité et une plus grande sécurité juridique pour le développement des projets, une meilleure connaissance de la ressource, une amélioration de la prédictibilité du productible et la recherche de synergies avec d'autres technologies afin d'optimiser l'insertion de la production d'électricité éolienne sur le réseau.

Des efforts de R&D devraient également être consentis pour réduire le recours à des ressources stratégiques et plus largement pour améliorer le bilan ACV des éoliennes.

### iii. Solaire

En 2010, la France a produit environ 0,09 Mtep (environ 1TWh) d'électricité d'origine éolienne pour environ 1,5 GW de puissance installée, exclusivement on-shore.

Aujourd'hui, la France est dotée de 4 GWc de photovoltaïque et produit environ 1% de son électricité avec le photovoltaïque.

Le photovoltaïque possède un important potentiel de développement si ses coûts de production continuent à diminuer, et sous condition d'un équilibre entre les profils de production et les profils de demande. : le développement à grande échelle du solaire PV passe par des performances économiques (il pourrait atteindre la parité réseau dans le sud de la France d'ici 7 à 15 ans selon le type d'installation considérée et la technologie choisie), mais aussi des capacités d'insertion dans le réseau qui seront d'autant plus nécessaires que le solaire sera important.

L'investissement dans le renforcement des réseaux sera hautement dépendant des règles de déploiement du photovoltaïque. Si le photovoltaïque est installé de façon anarchique et en particulier sous forme de grandes centrales opportunistes, l'investissement dans les réseaux devra être maximal.

D'un point de vue technologique, la technologie de cellules PV et de modules à base de Silicium continue à représenter la majorité du marché. Connue et mise en œuvre depuis les années 70, elle a bénéficié d'améliorations constantes avec des coûts de production de modules désormais de l'ordre de 0,6 €/Wc et des rendements moyens de conversion de l'ordre de 15 à 16%.

Pour autant il reste une marge de progrès technique pour faire baisser encore ce coût, ce qui constitue un objectif majeur pour permettre un développement de grande ampleur, sans subventions ou mécanismes d'accompagnements et en prenant en compte les coûts liés à l'intermittence (qui diminuent par ailleurs)

Les couches minces également connues et utilisées de longue date occupent une part du marché qui reste minoritaire. Les rendements inférieurs à ceux du Silicium ont empêché une percée plus significative. A terme, si les progrès sont suffisants, une bascule serait possible même si l'avance prise par le Silicium reste élevée.



Concernant le solaire thermique, les technologies sont matures même si des progrès (abaissement des coûts des capteurs et du stockage, capacité à s'intégrer aux autres sources) restent possibles. Certains pays (Autriche, Grèce, Chypre) ont déjà un taux de couverture à l'optimum.

Des ruptures technologiques sont attendues plutôt sur des sujets comme le stockage thermique de longue durée, la conversion de l'énergie pour fabriquer du froid et l'adaptation des technologies à des très grosses unités (réseau de chaleur).

#### iv. Energies marines

Aujourd'hui balbutiantes (principalement l'usine marémotrice de la Rance de 240MW), les perspectives industrielles des énergies marines seront liées à la capacité de la France de favoriser le développement de son tissu industriel autour de ces filières et à mettre à disposition ces technologies aussi bien pour nos propres besoins que sur un plan international.

#### v. Géothermie

En 2010, la France produisait environ 0,15 Mtep de chaleur issue de géothermie.

La géothermie consiste à exploiter la chaleur contenue dans le sous-sol, pour différents usages : production de chaleur, mais aussi de froid et d'électricité, en fonction des ressources géothermiques visées.

En géothermie basse et haute température, l'évolution technologique principale est le développement des *Engineered Geothermal Systems* (EGS). Le principe général est de s'orienter vers une nouvelle génération d'opérations géothermiques, visant à exploiter des ressources non exploitables par les techniques actuelles, car les débits voire les températures sont trop faibles ou trop incertains. Le principe est d'avoir recours à trois leviers permettant une production plus importante et donc plus rentable :

- L'amélioration des cycles de production d'électricité ou de cogénération en surface, en améliorant les rendements, la flexibilité, et en diminuant les impacts (emploi de fluides binaires non générateurs d'effet de serre...).
- L'amélioration des débits par la stimulation, chimique ou hydraulique, le démonstrateur de recherche de Soultz sous Forêts ayant permis de faire la preuve de ce concept.
- Le recours à des architectures de puits plus sophistiquées (puits subhorizontaux, etc.) pour augmenter la surface d'échange entre le puits et la formation et les débits correspondants.

La France comporte d'ailleurs de nombreux acteurs de l'industrie et de la R&D pour développer sa capacité installée et les emplois correspondants.

#### vi. Déchets

Le traitement des déchets par incinération est un procédé basé sur la combustion de déchets généralement mélangés qui consiste à réduire le volume et la masse de déchets solides : ordures ménagères mais aussi déchets industriels banals, etc.

Avec près de 130 usines réparties sur tout son territoire, la France possède le plus grand parc d'incinérateurs d'ordures ménagères d'Europe.



Si ce procédé permet la diminution du volume global de déchets, il détruit pour partie des matières valorisables (déchets organiques, méthanisation, recyclage, etc.) tout en générant des émissions polluantes et du CO<sub>2</sub>.

## 1.2.2. Vecteurs énergétiques

Parmi les vecteurs énergétiques on peut distinguer :

- ceux découlant d'un usage direct ou d'une transformation simple de sources primaires (ex. produits pétroliers raffinés) ;
- ceux résultant de transformations plus complexes, mettant en particulier en jeu des cycles thermodynamiques (électricité) ;
- et ceux issus de processus de récupération d'énergie (chaleur).

Ces vecteurs sont caractérisés par différents niveaux d'exergie (l'exergie est une unité permettant de mesurer la « qualité » d'une énergie, i.e. la part de cette énergie qui est utilisable pour réaliser un travail) qui les rend propices à la satisfaction d'une gamme d'usages plus ou moins large. L'une des dimensions de la différenciation des scénarios énergétiques réside bien dans le fait :

- soit de privilégier des vecteurs à haute exergie (électricité, éventuellement hydrogène), souvent coûteux à produire mais propices à la satisfaction de besoins très différents ;
- soit au contraire de rechercher une adéquation systématique des vecteurs employés à la qualité des usages énergétiques à satisfaire.

Des choix effectués dans ces domaines découleront des scénarios faisant notamment plus ou moins appel à l'électricité, par rapport à des vecteurs comme la chaleur basse ou moyenne température.

### *a) Le vecteur électrique*

Dans les pays de l'OCDE, la consommation annuelle moyenne d'électricité est de 35 MWh/hab/an. Avec 29 MWh/hab, la France se situe dans une position médiane en Europe, entre l'Allemagne (32 MWh/hab) et l'Espagne (24 MWh/hab). On relèvera également qu'à part quelques exceptions (Suède), la part de l'électricité dans la consommation finale varie dans les grands pays industrialisés dans une fourchette de 18 à 24% ; les pays disposant de sources primaires importantes, à l'instar de la France avec le nucléaire et l'hydraulique, se situent plutôt sur la branche haute de cette fourchette.

L'une des orientations stratégiques à déterminer dans le cadre de l'élaboration des politiques énergétiques est bien de savoir quel rôle peut et doit jouer l'électricité dans la transition vers des systèmes décarbonés. A un extrême, des scénarios de très forte efficacité et sobriété énergétique, mettant l'accent sur l'adéquation exergétique des vecteurs aux usages, conduisent à une décroissance marquée de la consommation d'électricité ; à l'autre extrême, des scénarios s'appuient sur l'électricité pour assurer la satisfaction des besoins énergétiques, en s'appuyant sur un mix nucléaire et renouvelable pour décarboner le mix énergétique.

Ainsi, dans les scénarios traités dans le cadre du Débat National sur la Transition Énergétique la fourchette obtenue pour la consommation d'électricité en 2050 s'établit entre 270 et 750 TWh (presque 1 à 3), contre 470 TWh aujourd'hui. Les scénarios de l'ANCRE présentés ci-dessous ne conduisent pas à une fourchette aussi large, mais ils font cependant apparaître des écarts importants



pour la consommation d'électricité, découlant d'hypothèses contrastées sur la sobriété énergétique et sur l'électrification des usages.

### ***b) Les vecteurs chaleur, hydrogène et les vecteurs secondaires***

Les réseaux de chauffage urbain représentent aujourd'hui une consommation finale de l'ordre de 3,5 Mtep mais dont seulement 1 Mtep est issu de source primaire non fossile, 2 Mtep correspondant à des dispositifs de cogénération issue de gaz naturel, charbon et fioul.

Un des enjeux de la diversification des sources et vecteurs énergétiques comme du développement d'écoquartiers à basses émissions est certainement le développement des réseaux de chaleur. Ce développement pourra s'appuyer d'une part sur la récupération des chaleurs perdues dans les centrales thermodynamiques (de la petite cogénération-gaz à la récupération de chaleur dans les centrales nucléaires) et d'autre part sur des réseaux locaux alimentés par des sources renouvelables (bois, solaire, PAC, géothermie, etc.).

La "cogénération nucléaire" est un dossier ouvert depuis de nombreuses années, parce que les quantités d'énergie théoriquement disponibles sont considérables (de l'ordre de 80 Mtep aujourd'hui), sans toutefois qu'aucun projet n'ait permis d'avancer sur la définition des paramètres techniques et des conditions de faisabilité sociale de ce type d'option. On comprend ainsi qu'en France, les difficultés rencontrées au plan sociétal par l'énergie nucléaire s'ajoutent à celles du développement de grands réseaux de chaleur haute température, contrairement à d'autres pays et malgré l'importance des gisements potentiels.

De nombreuses expériences sont actuellement en cours en France ou à l'étranger pour développer des réseaux avec boucle d'eau tiède ou chaude pour le chauffage et le refroidissement (par exemple pour les datacenters), associant chaleurs de récupération, géothermie de surface, pompes à chaleur, etc.. Ces smartgrids-chaleur, à coupler probablement aux smartgrids électriques constituent un champ d'expérimentation extrêmement fécond pour le développement de solutions locales permettant une plus grande autonomie énergétique et une forte réduction des émissions de GES à l'échelle d'un quartier ou d'une agglomération.

### **1.2.3. Réseaux et Stockage**

#### **a) Le réseau de gaz**

Le réseau de gaz français est particulièrement développé (près de 40 000 km de réseau de transport et plus de 200 000 km de réseau de distribution).

Le réseau de transport français est une infrastructure constituée de canalisations à hautes pressions (entre 30 et 70 bars) qui délivrent le gaz à l'entrée des communes.

Au niveau des communes, la distribution du gaz naturel est ensuite assurée par des canalisations à moyenne pression (4 bars), jusqu'à l'installation du consommateur où le gaz est livré à basse pression (300 ou 20 mBar) en aval du poste de détente et du compteur.

L'injection de biogaz (par méthanisation voire méthanation) ou d'hydrogène (en quantités limitées, en raison de limites de porosité et de stabilité du réseau) peuvent permettre d'imaginer une décarbonation progressive du réseau de gaz.



## ***b) Le réseau de chaleur***

Les réseaux de chaleur permettent de relier une ou plusieurs chaufferies centralisées, notamment de biomasse, à des consommateurs, qu'ils soient résidentiels, tertiaires ou industriels.

Leur développement en France est notamment porté par le Fonds Chaleur, qui doit permettre d'accroître le nombre de clients raccordés à un réseau de chaleur tout en accélérant le raccordement de moyens de production EnR à celui-ci.

Les réseaux de chaleur pourraient également servir pour la distribution de chaleur issue de cogénération nucléaire, actuellement non-exploitée.

## ***c) Le réseau électrique***

Le développement d'EnR engendrera de forts besoins en termes de construction et de renforcement de réseaux, non seulement pour le transport de l'électricité (interconnexions, grands sites de consommation, etc.) mais également au niveau de la distribution, puisque c'est au niveau du distributeur que la majeure partie des EnR sont raccordées.

Par ailleurs, si la gestion du réseau électrique est actuellement gérée principalement de manière centralisée, les évolutions actuelles, liées au développement importants de moyens décentralisés, tend à rapprocher producteurs, consommateurs et gestionnaires au sein de réseaux plus localisés (smartgrids, etc.), parfois même en lien avec d'autres réseaux (*power to gas*, etc.). L'impact de telles évolutions sur la production et la consommation d'électricité est encore mal connu.

## ***d) Les moyens de stockages de l'électricité***

De façon générale, les technologies actuelles ont toutes besoin d'améliorations significatives pour se déployer.

### ***STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)***

Si on peut considérer les STEP en région montagneuse à un niveau mature, des recherches sont toujours nécessaires pour optimiser les pompes-turbines (diminuer les pertes, vitesse variable) et les infrastructures. L'utilisation de cette technologie en bord de mer doit encore faire l'objet de recherches, pour limiter la corrosion par l'eau salée entre autres. En outre, des études sont aussi à conduire pour identifier les meilleurs sites potentiels, et évaluer les besoins en génie civil et les impacts sur l'environnement.

### ***CAES (Compressed Air Energy Storage)***

Des recherches sont en cours pour améliorer le fonctionnement du système de compression sous haute pression et haute température. Concernant le réservoir de stockage de la chaleur, la nature et les caractéristiques du container comme du milieu caloporteur sont critiques, notamment pour limiter les pertes. La tenue mécanique et la conductivité des matériaux pour les échangeurs sont aussi à améliorer. La turbine de détente, quant à elle, doit bien adapter la contrainte de variation de pression, par exemple à la haute température.

Des progrès sont également attendus sur l'étanchéité et la stabilité des cavités des systèmes AA-CAES. Les possibilités de stockage autres qu'en souterrain restent aussi à explorer.



## Volants d'inertie

Le principe du volant d'inertie repose sur le stockage et la restitution d'énergie cinétique. Les systèmes modernes sont constitués d'un cylindre rotatif massif, supporté par lévitation magnétique, couplé à un moteur/générateur.

La maintenance de tels systèmes est légère et leur durée de vie importante (> 20 ans).

Ils pourront apporter un service important au réseau : son temps de réponse très court permet de réguler une régulation fine de la fréquence.

## Procédés électrochimiques

Dans ce domaine, les progrès sont principalement attendus au niveau des matériaux et des composés chimiques utilisés notamment en liaison avec la thermique. De nouveaux procédés de fabrication et de mise en œuvre sont également étudiés, ainsi que des avancées sur la gestion de la batterie elle-même (gestion des réserves d'électrolytes entre autres) pour augmenter la durée de vie, l'autonomie et le recyclage du système. Les problématiques environnementales et de sécurité sont également à prendre en compte car les batteries contiennent des solvants polluants ou des terres rares (le lithium), et le sodium fondu à 300 °C ou les batteries Li-ion peuvent se révéler dangereuses.

## Stockage de chaleur

Les principaux axes de recherche portent sur les matériaux, dont il convient de diversifier l'offre, d'augmenter la durée de vie et d'améliorer les propriétés thermophysiques (haute température, rendement). La diminution du volume d'encombrement et la réduction des pertes entre stockeurs et échangeurs constituent deux autres voies d'évolution.

## Stockage d'hydrogène

Dans ce domaine, les attentes portent d'abord sur la production propre d'hydrogène. Concernant le stockage, les recherches concernent l'élaboration de nouveaux concepts et de nouveaux matériaux avec le maximum de sécurité et à un coût acceptable ; citons deux exemples de projets ANR en cours que sont le stockage de l'hydrogène dans les solides à pression ambiante et le stockage sous haute pression (350-700 bar).

D'une manière générale, les principaux sujets de recherche portent sur les procédés de fabrication et de mise en œuvre, les matériaux (contenant et contenu), le rendement global, l'autodécharge et les pertes, la durée de vie et le vieillissement, la sécurité, la localisation et le lien avec le réseau (approche système).

### 1.2.4. Bilan énergie et CO2 de la France

Le bilan de la consommation d'énergie finale de la France par secteur est le suivant :

	2010	2011	2012
Résidentiel-tertiaire	67,8	68,8	68,7
Transports	49,4	49,6	49,2
Industrie	33,3	32,5	32,1
Agriculture	4,4	4,4	4,4
<b>Total énergétique</b>	<b>154,9</b>	<b>155,3</b>	<b>154,4</b>
Non énergétique	12,2	12,4	12
<b>Total</b>	<b>167,1</b>	<b>167,7</b>	<b>166,4</b>



Le bilan de la consommation d'énergie finale de la France par source est le suivant :

	2010	2011	2012
Pétrole	65,3	66,2	64,6
Gaz	32,4	32,6	32
Charbon	5,7	5,4	5,2
Électricité	38,1	37	37,6
EnR	13,4	14	14,9
<b>Total énergétique</b>	<b>154,9</b>	<b>155,3</b>	<b>154,4</b>
Non énergétique	12,2	12,4	12
<b>Total</b>	<b>167,1</b>	<b>167,7</b>	<b>166,4</b>

Le bilan des émissions de CO<sub>2</sub> énergétique de la France par source est le suivant :

<i>CO<sub>2</sub> énergétique</i>	1990	2010	2011	2012
Transports	122	140	140	138
Résidentiel-tertiaire	95	86	90	86
Industrie	85	63	61	59
Production d'énergie	61	54	49	46
Agriculture	11	11	11	11
<b>Total</b>	<b>374</b>	<b>353</b>	<b>351</b>	<b>340</b>

L'année 1990 est indiquée car elle sert de référence pour les calculs internationaux et pour les engagements français en termes de réduction de ses émissions de GES. Au CO<sub>2</sub> énergétique, il convient notamment de rajouter les émissions de GES de l'agriculture (environ 100 MtCO<sub>2</sub>eq), des déchets, des consommations énergétiques, des PFC, HFC, SF<sub>6</sub>, etc. Au final, le bilan s'établit à 552 MtCO<sub>2</sub>eq en 1990 et 512 MtCO<sub>2</sub>eq en 2010.



## 2. Les lignes directrices des scénarios de l'ANCRE

La décarbonation du système énergétique à l'horizon 2050 suppose des changements structurels très profonds. Elle devra s'appuyer sur la maîtrise de la demande, par promotion de l'efficacité énergétique et par des changements plus ou moins marqués dans les comportements des consommateurs, ménages et entreprises, par le développement d'une offre énergétique adaptée, et par la gestion des réseaux et des vecteurs énergétiques de la manière la plus adaptée possible.

Dans cet esprit, l'ANCRE a défini trois scénarios décrivant des visions contrastées d'un avenir énergétique pour la France, à l'horizon 2050 :

- le scénario « Sobriété renforcée » (SOB), reposant essentiellement sur le triptyque sobriété poussée, efficacité énergétique renforcée et développement des énergies renouvelables ;
- le scénario « Décarbonation par l'électricité » (ELE), fondé sur la combinaison d'un effort marqué d'efficacité énergétique et d'un accroissement dans les usages de la part de l'électricité, qu'elle soit d'origine renouvelable ou nucléaire, en substitution d'énergies fossiles ;
- le scénario « Vecteurs diversifiés<sup>6</sup> » (DIV), misant sur l'efficacité énergétique, un renforcement limité des usages électriques, l'accent étant largement mis sur la diversification des sources (notamment la biomasse) et vecteurs d'énergies, et sur un rôle important des systèmes énergétiques intégrés.

S'il s'agit bien de futurs différents du point de vue des structures du système énergétique, **chacun répond à sa manière aux priorités de la politique énergie-climat évoquées en introduction.** Les trois scénarios proposés intègrent tous une part importante d'efficacité énergétique, mais se distinguent par un poids plus important accordé à certaines options, une orientation qui est déclinée secteur par secteur. Bien que très volontariste en terme de changements techniques et de modification des comportements, **l'exercice s'attache néanmoins à vérifier la cohérence et le réalisme d'ensemble des scénarios.**

Pour chacun des scénarios, la priorité initiale a été donnée à l'analyse de la demande énergétique et à la mobilisation des gains susceptibles d'être atteints en matière d'efficacité et de sobriété énergétique. Dans un second temps ont été identifiés les ruptures technologiques nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'hypothèse considérée de réduction de la part du nucléaire à l'horizon 2025.

La démarche a ainsi donné une place centrale à un travail de prospective sur la demande, à partir duquel des itérations ont été effectuées avec leurs conséquences en termes d'offre. Les scénarios ont finalement été construits en tenant compte des interdépendances entre moyens de production et vecteurs énergétiques, comme de l'émergence des nouveaux modèles de réseaux. **Pour chaque scénario, des ruptures technologiques sont proposées afin d'atteindre le Facteur 4 tous GES.**

---

<sup>6</sup> Ce scénario figure parmi les quatre retenus dans le cadre du Débat National sur la Transition Énergétique et pour les travaux qui lui succèdent comme référence d'une trajectoire misant sur des efforts d'efficacité énergétique modérés et sur une diversification du mix énergétique.



## 2.1. Le scénario « Sobriété renforcée » SOB

La trajectoire proposée dans ce scénario mise en premier lieu sur un comportement très vertueux, « sobre », du consommateur vis-à-vis de sa consommation énergétique. Les hypothèses sur les modifications de comportement prises en compte dans le scénario **SOB** concernent :

- le secteur des transports avec une évolution à la baisse de la mobilité (véhicule particulier), le recul du taux de motorisation individuel, le développement de modes de déplacements doux, du co-voiturage, de l'autopartage, etc. ;
- le secteur du bâtiment avec une moindre croissance des surfaces, une proportion plus importante de logements collectifs, l'absence d'effet rebond après rénovation, un ralentissement de la croissance des consommations d'électricité spécifique, etc...

Ces évolutions de comportement résultent notamment (mais pas uniquement) de la mise en place de dispositifs incitatifs appropriés (signaux tarifaires) ou réglementaires. La réduction des émissions se fait ainsi essentiellement en appel au triptyque :

- **sobriété**, à travers des modifications très significatives en termes d'usages et de comportements ;
- **efficacité énergétique**, avec notamment des investissements importants pour la rénovation des bâtiments existants et la récupération des chaleurs fatales ;
- **développement des énergies renouvelables variables (EnR)**.

*Rupture technologique* : Capture et stockage de de CO<sub>2</sub> (40MtCO<sub>2</sub>) et développement de solution d'effacement de la demande électrique.

## 2.2. Le scénario « Décarbonation par l'électricité » ELE

La trajectoire proposée dans ce scénario met en avant le vecteur électrique et l'efficacité pour réussir la transition énergétique. La décarbonation repose dans ce scénario sur un triptyque :

- **efficacité énergétique** ;
- **électricité d'origine renouvelable** (variable ou "dispatchable") ;
- **nucléaire**.

La caractéristique essentielle de ce scénario est qu'une électricité fortement décarbonée se développe comme vecteur et pénètre sur de nouveaux usages (industrie, transports automobiles, production d'hydrogène etc.) permettant ainsi de réduire la demande en énergies fossiles.

*Rupture technologique* : Stockage massif d'électricité (38GW – 47 TWh) de façon à permettre l'utilisation de la quasi-totalité de l'énergie produite par les EnR variables (ce qui amène à une utilisation de ce stockage en mode intersaisonnier). Si l'on acceptait d'effacer ces surplus EnR (et donc de les perdre), le besoin en stockage serait moindre tout en restant bien supérieur aux niveaux actuels (entre 10 et 15 GW).

## 2.3. Le scénario « Vecteurs diversifiés » DIV

La trajectoire proposée dans ce scénario repose sur l'utilisation importante de « nouveaux » vecteurs au sein du système énergétique, et ce plus particulièrement au niveau local :

- **valorisation des sources de chaleur fatale** (récupération de chaleur basse-température, chaleur des centrales électriques et sources renouvelables) ;



- **incorporation de bioénergies** aux vecteurs énergétiques conventionnels, liquides ou gazeux ;
- **efficacité énergétique.**

*Game changer* : Cogénération nucléaire (80 TWh vers le résidentiel-tertiaire et 40 TWh vers l'industrie). Le potentiel théorique de valorisation de la chaleur issue de cogénération nucléaire est très important en France étant donné la puissance nucléaire installée ; pour autant, ce gisement est pour l'instant totalement inexploité.

## 2.4. Les autres scénarios

### 2.4.1. La variante « Nucléaire et EnR » : ELEC-V

Un quatrième scénario a été élaboré ultérieurement afin d'évaluer les conséquences d'un mix électrique qui demeurerait plus proche du mix actuel pour le nucléaire, mais avec néanmoins une progression significative des énergies renouvelables variables (EnR).

Ce scénario conserve la base des hypothèses du scénario **ELE**, c'est-à-dire un effort d'efficacité énergétique important et une utilisation du vecteur électrique pour assurer la décarbonation de nouveaux usages de l'énergie. Mais, dans ce cas, la part de l'énergie nucléaire dans l'électricité décroît moins et reste bien supérieure à 50 % en 2025. Une part de cogénération nucléaire est également intégrée dans ce scénario. Un espace suffisant est néanmoins créé pour un développement significatif des énergies renouvelables variables, compatible avec les objectifs européens dans ce domaine.

### 2.4.2. La trajectoire de référence, dite « tendancielle » TEND

A des fins de comparaison et d'évaluation, une trajectoire dit "de référence" a été construite. Elle permet d'illustrer ce que serait la dynamique du système énergétique français si l'on prolongeait les tendances actuellement observées, tenant compte des engagements gouvernementaux des politiques énergétiques et de climat. Notamment, cette trajectoire n'est donc pas « à parc constant » puisqu'elle prend en compte les dynamiques récentes, par exemple en termes de rythmes d'installation d'EnR.



## 3. Les résultats

L'ANCRE s'est proposé d'explorer les voies permettant d'atteindre le Facteur 4 pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 à travers l'analyse comparative de ces trois scénarios contrastés. Deux résultats principaux sortent de notre étude :

**- Les trois scénarios permettent d'atteindre le Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique.**

Pour cela, ils actionnent plusieurs leviers:

- un investissement important pour les options d'efficacité et de renouvelables ;
- des évolutions de comportements ;
- et des ruptures technologiques (*game changers*) ;

**- Les scénarios permettent une baisse de 65 à 70% de la totalité des émissions de GES**

L'atteinte du Facteur 4 sur tous les gaz à effet de serre nécessiterait d'étendre les travaux de prospective à des secteurs qui sortent du champ énergétique actuellement considéré (notamment les pratiques agricoles et celles de l'élevage, pour lesquels les scénarios de l'INRA sont actuellement utilisés aboutissant à une division par 2 des émissions des GES du secteur). D'autres opportunités de changements techniques et de modifications des comportements devraient sans doute aussi être mobilisées, ce qui fera l'objet de travaux ultérieurs.

### 3.1. Résultats sur la consommation d'énergie

Les travaux de l'ANCRE ont été réalisés selon le processus suivant :

- analyse et agrégation des évolutions des besoins énergétiques des différents secteurs ;
- impact de ces évolutions sur le secteur de l'énergie (production d'électricité, raffinage de pétrole, transport et distribution de gaz et de chaleur) ;
- évolution en conséquence du mix énergétique.

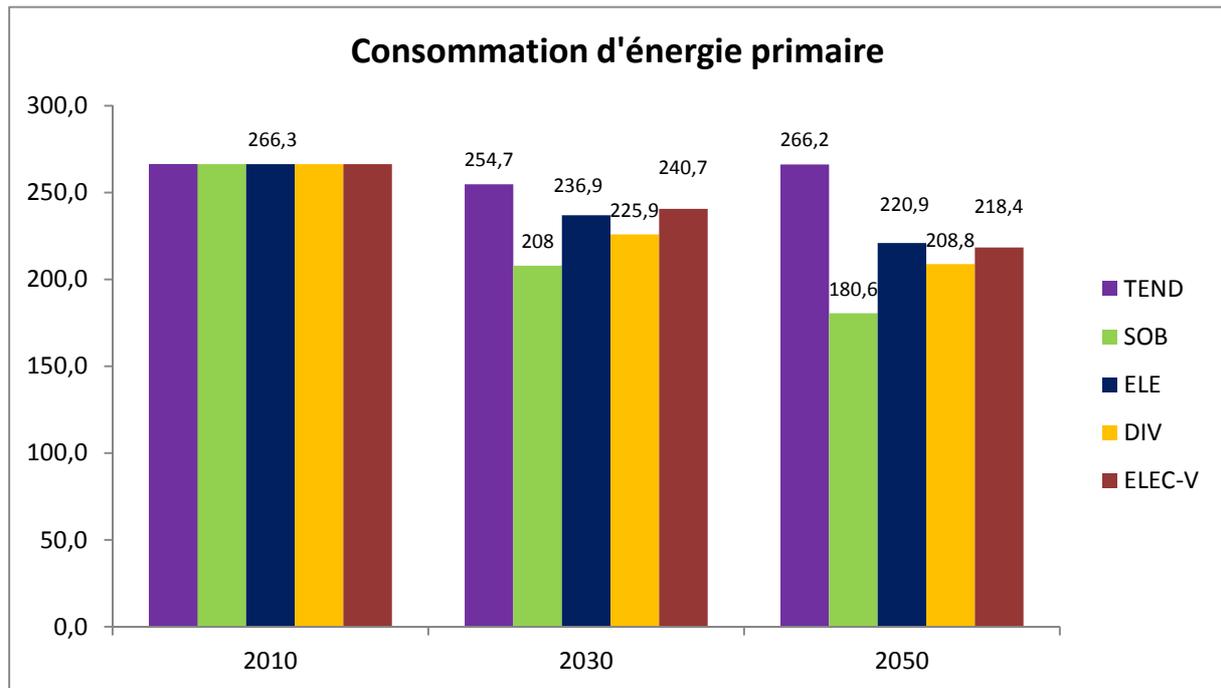
La prise en compte des objectifs initiaux (atteinte du Facteur 4 et part du nucléaire de 50% en 2025) contraint le système et impose des choix technologiques pour assurer à la fois la production et l'équilibre de l'ensemble. Le secteur de l'énergie se caractérise par des constantes de temps très longues et toute inflexion, même d'envergure et résultant d'une volonté politique, ne se concrétisera que des décennies après son implémentation.

La demande globale est supposée rompre avec la tendance historique d'augmentation continue de la consommation énergétique par habitant. Cette inversion relève à la fois d'une nécessité de réduction de la consommation de ressources épuisables et d'une prise de conscience collective de l'impact de nos sociétés sur l'environnement. Tous les scénarios misent sur un renforcement plus ou moins poussé de la sobriété énergétique et de l'efficacité de production et d'utilisation rationnelle de l'énergie.

#### 3.1.1. Bilan en consommation d'énergie primaire

Dans le scénario tendanciel, l'énergie primaire consommée est à peu près stable dans le temps, les efforts de réduction venant contrebalancer les effets dynamiques qui poussent à l'augmentation, notamment la démographie et la croissance économique.

Si, sans surprise dans un scénario de sobriété, la consommation primaire est fortement réduite dans le scénario **SOB** (-32%) par rapport à 2010, une différenciation assez nette se reflète au niveau de l'énergie primaire entre cette fois le scénario **DIV** et les autres scénarios **ELE** et **ELEC-V**. En effet, alors que ces deux derniers scénarios favorisent plutôt le vecteur électrique, la diversification mise assez largement sur la biomasse.

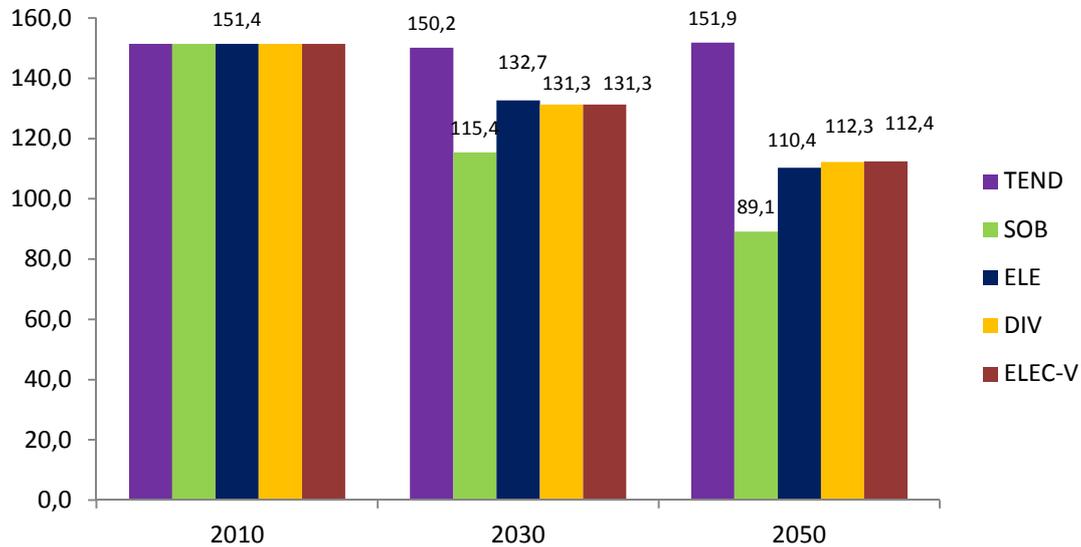


Les calculs pour l'énergie primaire incluent les consommations à usages non énergétiques ainsi que les transports internationaux.

### 3.1.2. Bilan en consommation d'énergie finale

Les calculs pour l'énergie finale sont au format « standard », c'est-à-dire qu'ils n'incluent ni les consommations à usages non énergétiques, ni les transports internationaux. Leur prise en compte ajouterait environ 20Mtep à la consommation finale d'énergie. Ce format permet une meilleure comparaison entre les scénarios de l'ANCRE et les autres scénarios proposés lors du DNTE.

## Consommation d'énergie finale



Côté demande, seul le scénario **SOB** se distingue nettement des autres dans le bilan final affichant une baisse significative par rapport à aujourd'hui (-41%).

Les scénarios **ELE**, **DIV** et **ELEC-V**, bien qu'étant sur une inversion de tendance, indiquent une demande d'énergie finale de l'ordre de 110-112 Mtep. Cette réduction de -27% traduit néanmoins un effort considérable de réduction.

### 3.1.3. Evolution de la consommation d'énergie dans le résidentiel-tertiaire

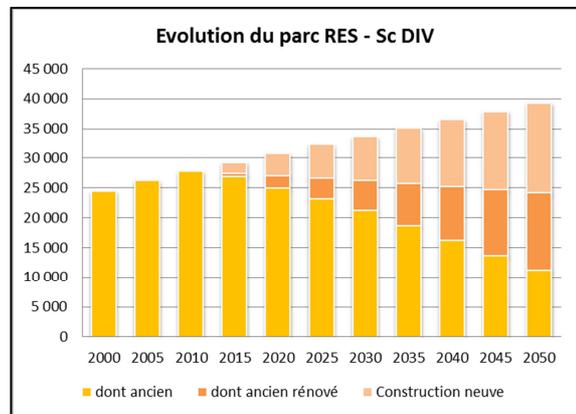
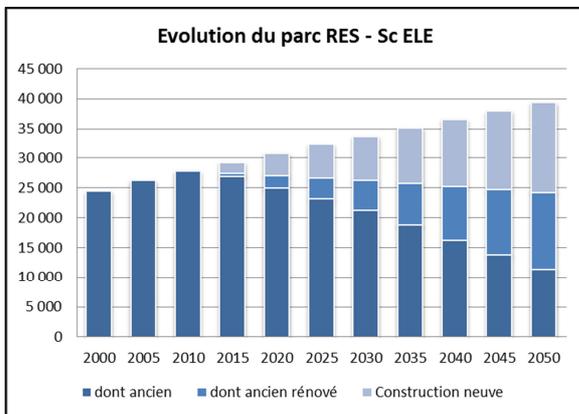
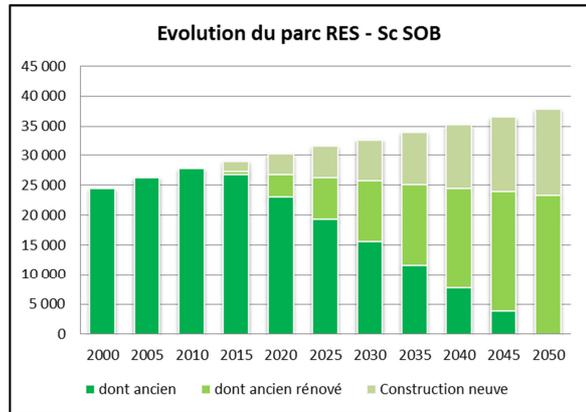
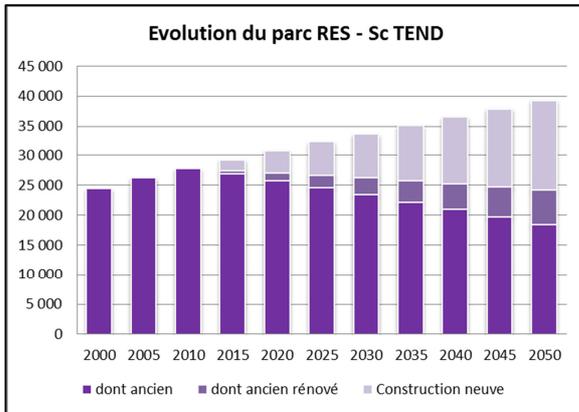
Concernant le secteur résidentiel et tertiaire, les principales différences entre les scénarios portent sur le rythme de rénovation du parc existant et sur les performances de la rénovation.

Dans les scénarios **ELE** et **DIV**, le rythme annuel de rénovation est porté à 350 000 logements/an (en moyenne sur la période) et 15 Mm<sup>2</sup> dans le tertiaire contre, respectivement, 150 000 logements/an et 10 Mm<sup>2</sup> actuellement. Le niveau de performance de la rénovation thermique permet en théorie d'économiser 60% par rapport à la consommation de référence du parc existant mais la prise en compte d'un effet-rebond limite le gain effectif de 10%. La consommation d'électricité spécifique se stabilise dans le scénario **DIV** puis décroît légèrement après 2030. Elle continue à augmenter puis se stabilise dans **ELE**.

Dans le scénario **SOB**, l'effort de rénovation du parc existant est fortement accru et passe à 650 000 logements/an et 25 Mm<sup>2</sup> pour le tertiaire. Par ailleurs, la rénovation thermique permet d'économiser jusqu'à 70% d'énergie de chauffage (et ECS) sans que l'on suppose un effet-rebond notable. De même, la consommation d'électricité est supposée se stabiliser dès 2015 puis décroître après 2030.

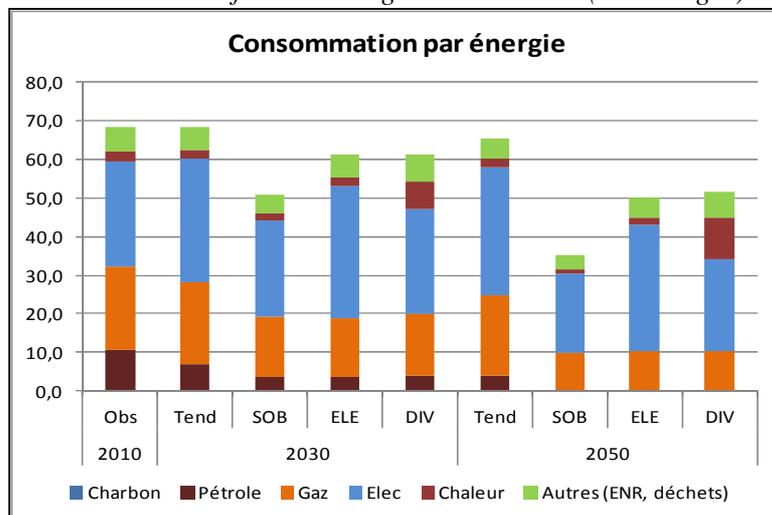


## Evolution du parc résidentiel



Les performances du parc neuf sont supposées identiques dans les trois scénarios, mais ceux-ci différencient en ce qui concerne les surfaces construites. Dans le scénario **SOB**, la proportion de logements collectifs augmente, ce qui se traduit par un ratio de surface / habitant plus faible ; de même dans le tertiaire, les surfaces par emploi sont moins importantes que pour les scénarios **DIV** et **ELE**.

## Consommation finale d'énergie dans le R&T (tous usages)





Dans le scénario de référence, la construction de bâtiments neufs très performants et la poursuite du rythme de rénovation tendanciel permettent une stabilisation de la consommation totale d'énergie finale dans les bâtiments entre 2010 et 2050.

Le fort accroissement du volume de rénovation dans les scénarios **ELE** et **DIV** (on passe alors de 150 000 logements en rénovation lourde par an en 2010, à 300 000/an en 2030, puis 400 000/an au-delà) permet une diminution de la consommation d'énergie finale de 25% (le gain est plus marqué dans le résidentiel, 26%, que dans le tertiaire 21%). La consommation atteint alors 51 Mtep contre 65 Mtep dans le scénario de référence.

Dans le scénario **SOB**, le nombre de rénovations lourdes est fixé à 650 000/an et le niveau de performance des rénovations est encore accru par rapport à **ELE** et **DIV** ce qui permet d'atteindre 35 Mtep en 2050, soit une réduction de la consommation d'énergie finale proche de 50% (à nouveau un peu plus marquée dans le résidentiel que dans le tertiaire).

Dans le scénario de référence, la part des différentes sources d'énergie est inchangée pour les usages thermiques, sauf baisse de la part du fioul. De même les parts de marché sont assez peu modifiées dans le scénario **SOB** qui se traduit néanmoins par une disparition du fioul, un recul du gaz et une augmentation de la part relative de l'électricité, essentiellement due aux usages spécifiques. En revanche les deux scénarios **ELE** et **DIV** présentent des mix très différents de la référence. Dans le scénario **ELE**, le développement massif des pompes à chaleur aérothermiques et des chauffe-eau thermodynamiques place l'électricité comme première source d'énergie pour les usages de chauffage et eau chaude sanitaire. Dans le scénario **DIV**, la transformation majeure est due au très fort développement de la chaleur en réseau (grands réseaux urbains alimentés par la chaleur cogénérée par les centrales électriques ou réseaux indépendants alimentés en biomasse) et dans une moindre mesure au développement des autres sources de chaleur renouvelable (biomasse en usage direct, solaire basse température).

### 3.1.4. Evolution de la consommation d'énergie dans les transports

Concernant le secteur transport, les divergences entre les différentes trajectoires proposées par l'ANCRE portent sur :

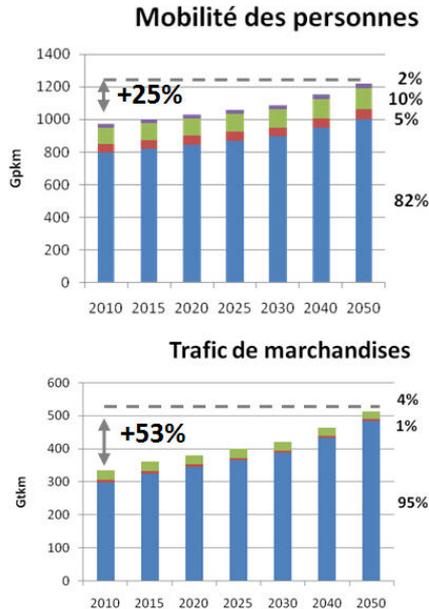
- l'évolution de la demande de mobilité,
- la part relative des différents modes de transport,
- les technologies et vecteurs énergétiques privilégiés.

Les hypothèses en termes d'évolution de la demande de mobilité divergent entre le scénario **SOB** et les deux autres scénarios **ELE** et **DIV**. Les tendances observées sur les dix dernières années sont poursuivies dans les scénarios **ELE** et **DIV**. La mobilité des personnes, en passagers-kilomètre (pkm), augmentent de 25 % entre 2010 et 2050, un accroissement essentiellement lié à l'évolution de la population (72 millions d'habitants en 2050). Sur cette même période le transport de marchandise, exprimé en tonnes-kilomètre (tkm) augmente de 53 %.

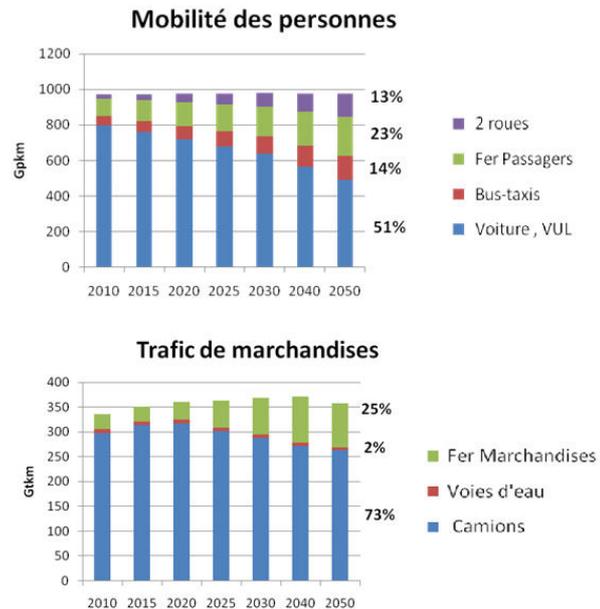


## Evolution de la demande de mobilité

### ELE - DIV



### SOB



Dans le scénario **SOB**, l'hypothèse est faite d'une modification forte des comportements et des modes d'organisation. La mobilité individuelle diminue de 20 % en moyenne sur les 40 ans projetés ce qui se traduit par une stabilité du volume global de passagers-kilomètre, ceci malgré l'augmentation de la population. Cette diminution est imputable à l'adoption de modes de transport doux (vélo, marche) et de nouveaux modes d'organisation (télétravail, généralisation des livraisons à domicile etc.).

Les services de mobilité se développent, le rapport à la voiture particulière se modifie, permettant une adaptation du type de véhicule au type de déplacement (petit véhicule électrique en ville etc.). Le parc automobile (véhicules particuliers – y compris de flottes *servicielles* –, véhicules utilitaires légers) diminue d'environ 40 % par rapport à 2010. En matière de transport des marchandises, un effort très important est fait pour rationaliser le trafic, les productions locales sont privilégiées. La conséquence est un maintien du nombre de tonnes-kilomètre au niveau observé en 2007 (avant crise), soit 360 milliards de tkm.

**La part relative des différents modes de transport** reste équivalente à celle de 2010 sur l'ensemble de la période pour les scénarios **DIV** et **ELE**. Elle est profondément modifiée dans le scénario **SOB** : la part de la voiture dans la mobilité des personnes se réduit, passant de plus 80 % en 2010 à 50 % en 2050. Ce basculement se fait au profit du ferroviaire, des transports en commun routiers et des deux-roues motorisés ; dans le domaine du transport de marchandises, un effort particulier est fait pour développer le ferroutage qui est multiplié par trois par rapport à son niveau actuel, soit un accroissement de 50 % par rapport au niveau le plus haut observé en 2000.

**En termes de technologie**, dans tous les scénarios les rythmes d'innovation et de diffusion de celle-ci sont accélérés. Ceci se traduit par une forte pénétration dans le parc des motorisations alternatives et une amélioration de l'efficacité énergétique globale beaucoup plus rapide qu'observée sur les dernières années. Dans tous les scénarios, la part des véhicules électrifiés (véhicules électriques – VE – et véhicules hybrides rechargeables – VHR) dans le parc est au moins de 25 % à l'horizon 2050, atteignant même 45 % dans le scénario **ELE** qui met l'accent sur ce type de solution. L'effort



d'innovation permet de réduire la consommation unitaire des voitures continuant à utiliser des carburants carbonés, de 50 % (**ELE** et **SOB**) à 55 % (**DIV**) par rapport à 2010.

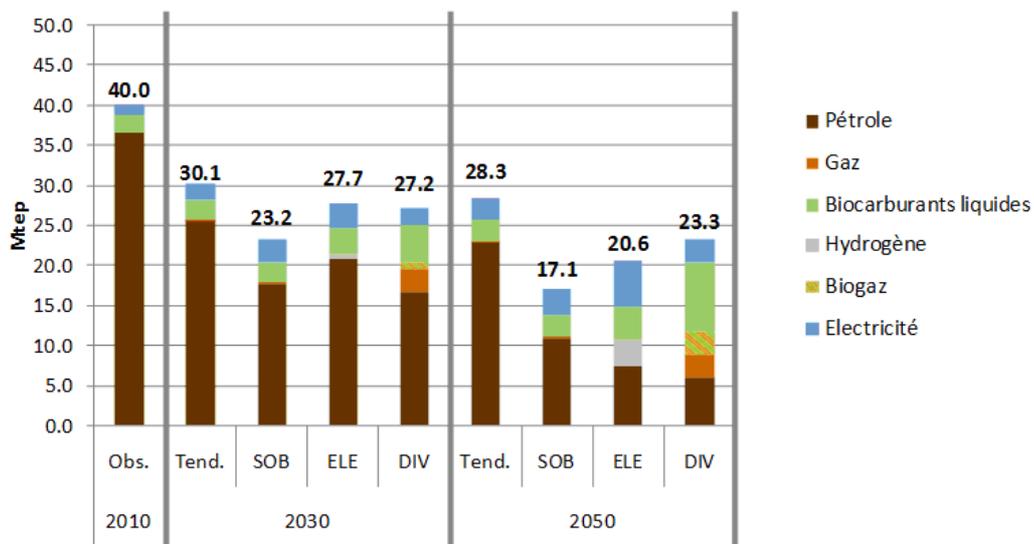
Pour les trois trajectoires étudiées, le défi technologique est important, il s'agit en effet d'accélérer le rythme d'innovation et de diffusion de l'innovation sur les véhicules, essentiellement selon deux axes : la diminution de leur consommation unitaire et le développement de motorisations alternatives, solutions électrifiées (véhicules électriques, véhicules hybrides rechargeables) par exemple.

**En termes de vecteurs énergétiques**, le scénario **DIV** se distingue par un développement soutenu du gaz et des biocarburants (liquides ou gazeux) à partir de biomasse ligno-cellulosique. Dans le scénario **ELE**, l'hydrogène fait son apparition en 2030. Dans tous les cas la part de l'électricité augmente.

**Les hypothèses de changement sont également de type organisationnel** : avec le développement d'une offre de mobilité multi-mode, de flottes servicielles adaptées au type de déplacement, une modification de l'aménagement urbain et des infrastructures de transports dans le scénario **SOB** ; le renforcement du réseau électrique et la construction d'infrastructures de recharge allant de pair avec le développement d'une mobilité électrique poussée dans le scénario **ELE** ; la structuration d'une importante filière de production de biocarburants (liquides ou gazeux) de deuxième, voire troisième, génération dans le scénario **DIV**.

Quel que soit le scénario, la consommation finale d'énergie du secteur transport diminue, de 40 à 57 % selon la trajectoire. Le scénario **SOB** qui fait l'hypothèse d'une forte réduction de la demande de mobilité, en plus d'un effort d'innovation, conduit à la réduction la plus importante.

Consommation par énergie

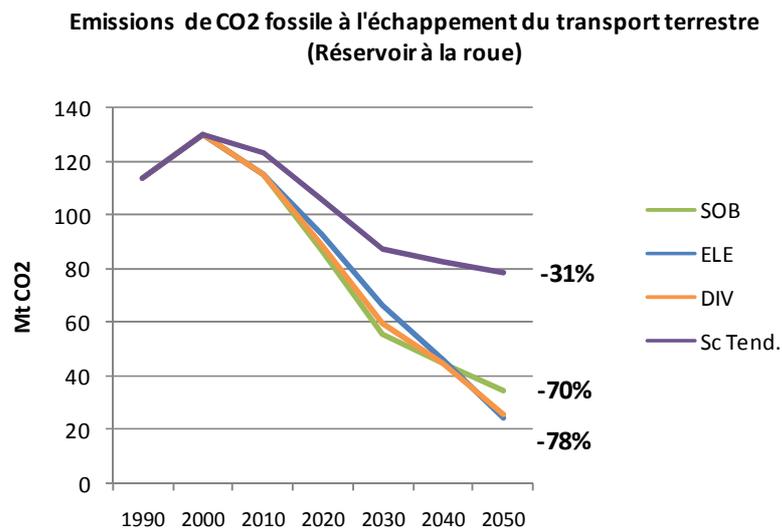


Mais dans tous les scénarios les carburants fossiles représentent encore, à 2030, plus de 65 % de l'énergie consommée dans le secteur. La baisse des carburants fossiles par rapport à un scénario tendanciel est plus importante à l'horizon 2050. Sur l'ensemble de la période 2010-2050, les volumes de carburants fossiles consommés sont au moins divisés par trois (**SOB**), voire par 4 à 5 (**DIV** et



**ELE**). La part de la biomasse reste modérée pour **SOB** et **ELE**, respectivement 15 et 20 %, mais devient majoritaire pour le scénario **DIV**, avec 50 %.

Les émissions de CO<sub>2</sub> fossile du transport sur la partie du "réservoir à la roue" sont réduites d'au moins 70 %, dans le cas de **SOB**, la réduction atteint près de 80 % dans **ELE** et **DIV**.



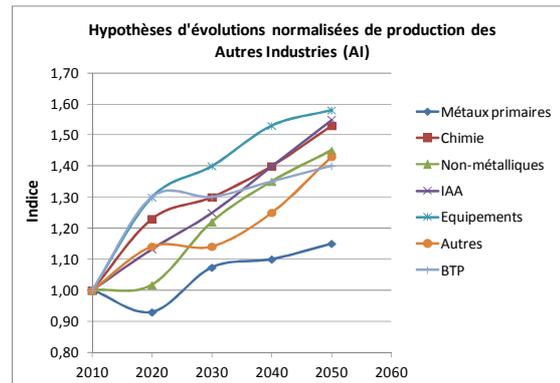
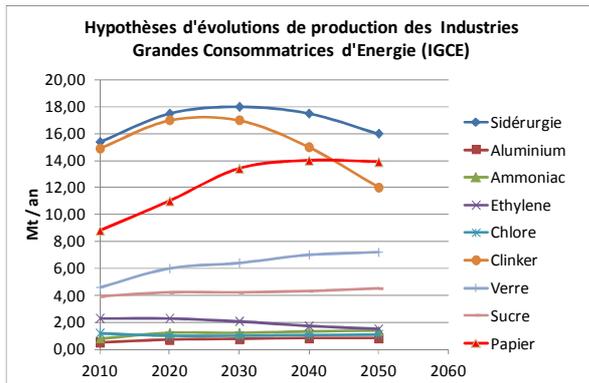
### 3.1.5. Evolution de la consommation énergétique de l'industrie

Les scénarios ont été construits sur la base d'une méthode simple d'analyse factorielle, croisant les 3 déterminants suivants :

- **Un indicateur d'activité de la branche.**
- **Une intensité énergétique.**
- **Un vecteur de la consommation d'énergie** construit en deux étapes : électricité et non électricité (puis ventilation de ce poste).

#### *Activités économiques des branches*

Les activités des branches sont les mêmes dans les 3 scénarios et leur construction a été calée sur le scénario Enerdata AMS-O pour la DGEC. Ce scénario suppose un taux de croissance industriel de 1,7% jusqu'en 2030. Dans un premier temps, cette tendance a été prolongée jusqu'à 2040 et le taux porté à 1,8% entre 2040 et 2050. Puis des ajustements ont été apportés à certains secteurs. La figure qui suit donne les grandes évolutions des productions des branches. Les points les plus notables concernent la production de clinker (pour le ciment à usage du bâtiment) et de ferrailles et d'aciers. Les deux branches suivent une production en cloche résultant de la conjugaison de l'accroissement de la demande puis d'un effet de substitution par d'autres matériaux dans la construction (avec un taux accru dans le scénario **SOB**), ainsi que d'un ralentissement de l'usage des produits ferreux à partir de 2030, suite aux relatives baisses des débouchés dans la construction et l'automobile, ainsi qu'à une extension du recyclage.



IGCE : issues des scénarios Enerdata DGEC Grenelle MS-O prolongées 2030-2050 (GP8 et CEA/Idésé)

AI : Idem et prolongement 2030-2050 suivant un taux moyen de croissance moyen de l'ordre de 1%. Les facteurs d'écart par rapport à ces tendances sont calculés selon les dynamiques propres à chaque scénario.

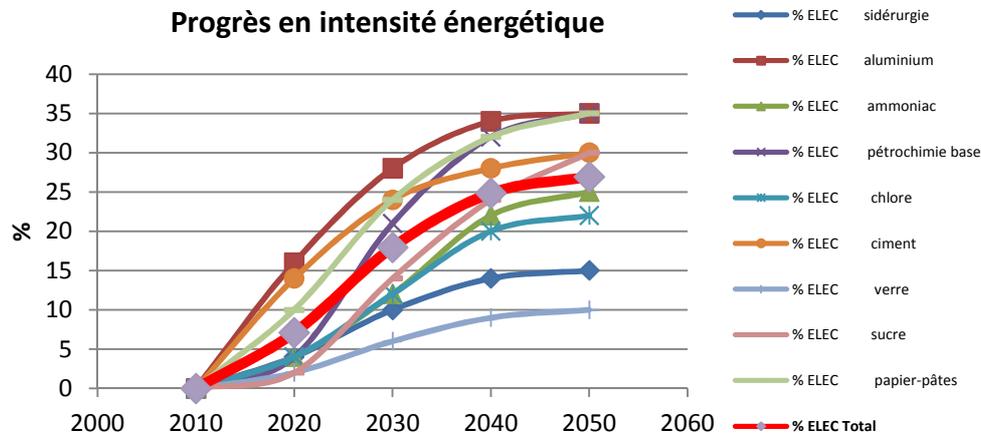
### Gains en intensités énergétiques des branches

La mise en œuvre de nouvelles technologies contribuera à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur industriel (85 Mt CO<sub>2</sub> en 2010 soit 23% des émissions françaises) et au respect des engagements français en la matière. Le détail en termes d'intensité énergétique a été construit en distinguant :

- L'intensité électrique
- L'intensité en autres vecteurs

Les gains possibles d'efficacité énergétique dans chacun de ces sous-secteurs ont été déterminés principalement sur la base des travaux du CEREN. Le CEREN évalue en effet des « gisements » d'efficacité énergétique libellés en énergie totale. Le CEREN a fourni essentiellement des résultats par système énergétique ou procédé (pompe, chauffage, moteurs...). Quelques résultats structurés par branches sont également disponibles. Nous avons aussi pour partie décliné l'ensemble des gains selon qu'ils sont dus à des technologies éprouvées (disponibles aujourd'hui et dont le temps de retour sur investissement est connu), des technologies innovantes ou des mesures organisationnelles. Les coproduits de l'industrie (chaleur fatale, valorisation énergétique des déchets, etc.) sont chiffrés dans la partie offre énergétique. Les gains indiqués par le CEREN sont réputés obtenus via la mise en œuvre de technologies existantes, donc sans progrès technique additionnel.

In fine, la modélisation retenue a été tout d'abord construite pour le scénario SOB. L'analyse a été menée branche par branche. Les courbes présentées ci-après montrent que pour les industries « grosses consommatrices d'énergie » (IGCE), les gains sont de plus en plus difficiles à atteindre. Une telle trajectoire est bien cohérente avec la situation d'industries qui prêtent une forte attention à la maîtrise de leurs consommations. La figure décrit les évolutions des progrès en termes de gains d'intensité énergétiques électriques du scénario SOB, pour les IGCE une courbe à la hausse signifie que les gains augmentent et donc que l'intensité baisse).

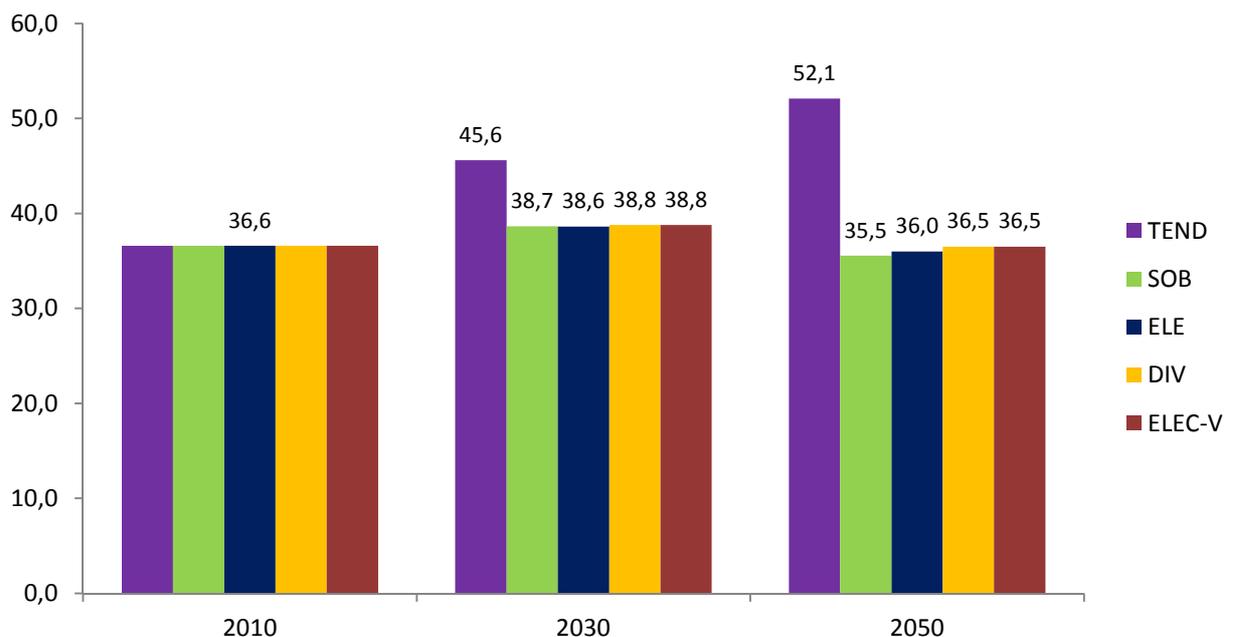


Au plan économique, le gain apporté (économies d'énergie, productivité, qualité...) doit être élevé au regard du coût d'investissement et les systèmes proposés doivent être au moins aussi fiables que ceux qu'ils remplacent. Dans ce cadre, les systèmes d'aide à l'investissement "écologique" et/ou de bonus-malus auront un rôle à jouer dans le déploiement des technologies.

#### Evolution de la structure de la consommation non électrique des branches

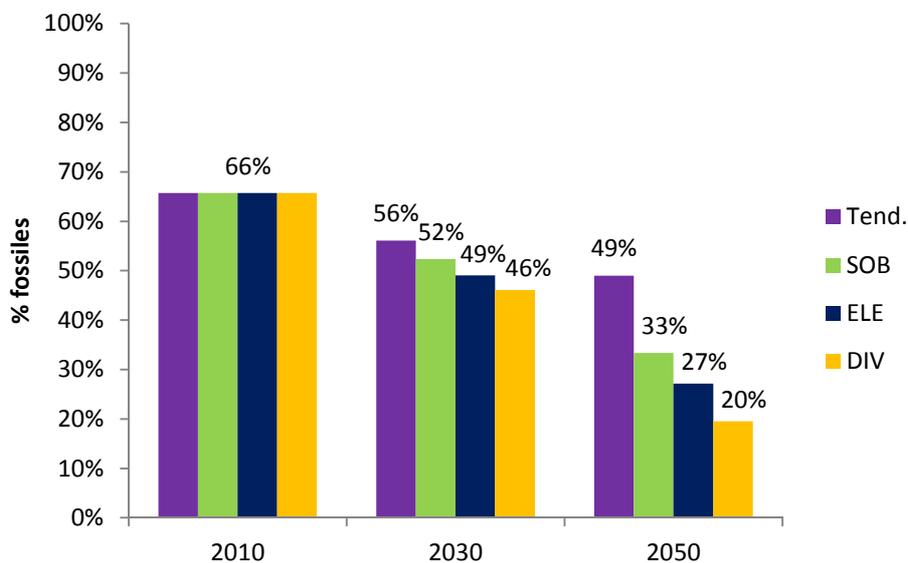
Enfin, nous avons construit des matrices d'évolution de la structure de la consommation énergétique non électrique de l'industrie. Bien entendu, les vecteurs ont été traités spécifiquement un par un, notamment pour ce qui concerne les nouveaux vecteurs tels que l'hydrogène ou la géothermie. Par contre, en ce qui concerne les EnR électriques réparties (éolien et solaire), nous n'avons pas retenu de description spécifique de la localisation géographique de ces sources. Le graphique suivant illustre, en Mtep, l'évolution de la structure des énergies non électriques de l'industrie dans le scénario **DIV**.

### Consommation d'énergie dans l'industrie



La dépendance aux énergies fossiles évolue de la façon suivante :

## Part d'énergie fossile dans la consommation finale de l'industrie



### Prise en compte de la capture et séquestration du carbone (CSC)

Nous supposons une mise en œuvre de la technique de Capture et Stockage du Carbone –CSC à partir de 2030. Au total, cette technique serait à même de capturer et stocker de l'ordre de 40 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à partir de 2040 dans le scénario **SOB**. L'industrie est le secteur qui en bénéficie le plus, avec 30 millions de tonnes/an stockées. Le CO<sub>2</sub> serait injecté dans les couches du Dogger du Nord de la France.

Nous avons tenu compte de cette possibilité (*game changer*) de la façon suivante :

- réduction des émissions (au niveau du module de consolidation).
- augmentation des consommations d'énergie de 15% pour les énergies concernées, répartie en un quart d'électricité et trois-quarts d'énergie fossiles (pour la capture et la séquestration).

En fin de période, la séquestration augmente les consommations d'énergies fossiles de l'ordre de 2%, pour une diminution des émissions de l'ordre de 12%.

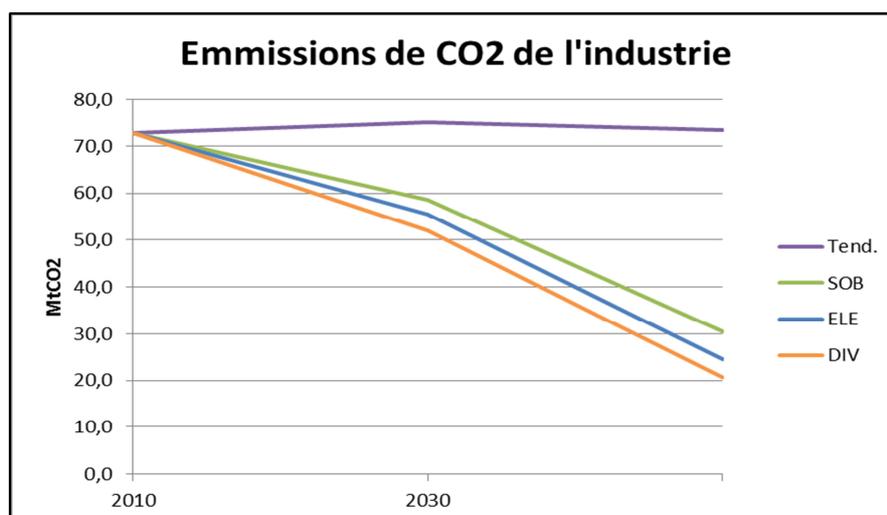
Les lignes directrices des scénarios ont été les suivantes :

- **Scénario « Sobriété »** : la quasi-totalité du gain maximal « à technologies connues » est atteint en 2025-2030. Les effets des nouvelles technologies jouent à partir de 2025 et prennent une grande ampleur dans les deux dernières décennies. Les effets de substitution prévus par le scénario jouent un rôle déterminant, mais sont toutefois inférieurs aux hypothèses du second scénario. A grands traits, les effets dus à l'innovation induisent une augmentation d'efficacité énergétique de l'ordre de 30% en fin de période (les autres effets pesant pour environ 20%).

- Scénario « Décarbonation par l'électricité »** : le scénario est bâti sur une trame proche du scénario précédent. Toutefois, le gain maximal en intensité énergétique est supposé moins fort, avec un coefficient d'abattement de 10% du gain sur toute la période. On suppose qu'une part significative de l'effort tend à profiter des gains d'intensité énergétique rendus possibles par une forte substitution des énergies fossiles par l'électricité (en premier lieu) et les EnR non électriques. Macroscopiquement, ce gain est évalué à une substitution de 3 Mtep en 2030 (et 6 Mtep en 2050) par ces nouvelles énergies, dont l'essentiel est électrique. La substitution est comptabilisée avec une équivalence à la consommation (0,086 Mtep substitués par 1 TWh). Il s'agit donc d'une demande électrique accrue de 35 et 70 TWh respectivement à ces deux dates. Dans ce scénario, les activités de certains secteurs fortement consommateurs d'électricité (acier, hydrogène) sont plus importantes que dans les autres scénarios.
- Scénario « Vecteurs diversifiés »** : ce scénario est bâti sur les mêmes tendances en niveaux de consommation énergétique que le scénario précédent, avant la prise en compte des mesures de substitution accrues. Le développement des plates-formes industrielles territoriales amène toutefois une baisse de la consommation, estimée à 5% en 2050. La répartition entre électricité et autres énergies reste ici la même que celle que fournit l'analyse des efficacités du second scénario. Par contre, le spectre énergétique est nettement élargi, avec un rôle nettement plus fort des EnR, notamment de la chaleur et du biogaz issus de la biomasse.

Au total, compte tenu de la croissance de l'industrie, ce secteur voit, selon les scénarios, sa consommation d'énergie stabilisée sur la période de projection. Ceci n'est possible que parce que les intensités énergétiques diminuent de l'ordre de 30%, sachant que certaines des IGCE ne suivent pas le même sentier de croissance que l'ensemble de l'industrie.

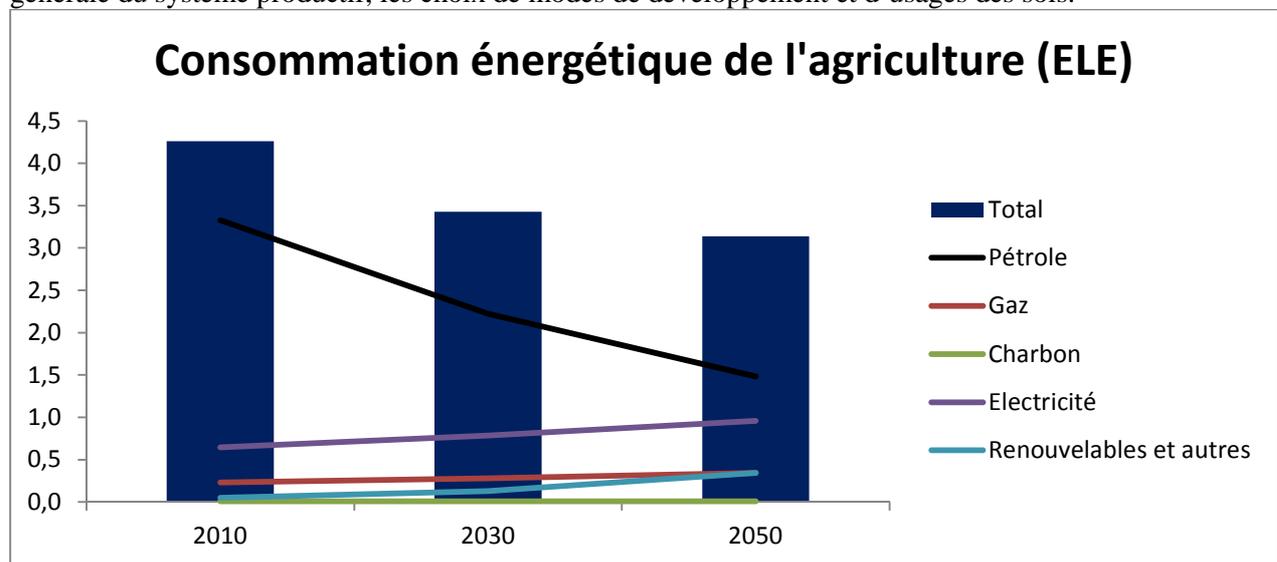
Le reste des gains est dû à l'évolution du mix, avec une augmentation de la part de l'électricité (surtout dans le scénario **ELE**) et des énergies vertes (principalement la biomasse dans le scénario **DIV**). Des facteurs très importants sont aussi le recours à la cogénération nucléaire (40 TWh d'énergie thermique dans le scénario **DIV**) et la capture et séquestration du CO<sub>2</sub>. La figure suivante illustre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> énergétique) des différents scénarios.



### 3.1.6. Evolution de la consommation énergétique de l'agriculture

Dans l'exercice ANCRE, les déterminants de la demande d'énergie de l'agriculture et de la sylviculture sont peu pris en compte contrairement aux scénarios ADEME 2012, qui ont intégré des évolutions des modes de consommation alimentaire et leurs impacts sur l'agriculture, ou aux scénarios INRA 2013, qui se sont focalisés sur de nouvelles pratiques culturales avec l'identification de dix actions restant compatibles avec une production agricole élevée pour réduire les GES.

En effet, l'approche a avant tout porté sur l'adéquation entre la demande énergétique totale des secteurs et l'offre domestique de biomasse techniquement récoltable, une fois déduites la demande alimentaire et la demande non-énergétique pour le bois (bois construction et bois d'œuvre). Un élément clef dans l'évaluation des potentiels énergétiques est de prendre en compte l'organisation générale du système productif, les choix de modes de développement et d'usages des sols.



Les émissions de GES (énergétiques et non énergétiques) de l'agriculture sont reprises de scénarios de l'INRA cohérents avec l'évolution du potentiel en biomasse disponibles, induisant une division par deux des émissions de GES à l'horizon 2050 sur le secteur.

## 3.2. Résultats pour la production d'énergie

### 3.2.1. Bilan de la production d'énergie

Une fois pris en compte le niveau de consommation d'énergie finale, les scénarios se différencient surtout par les moyens mis en œuvre pour la production de cette énergie. Si le scénario **ELE** suppose un recours plus important à l'électricité, le scénario **DIV** fait un usage plus marqué de la biomasse et de la chaleur. Quant à **ELEC-V**, il repose sur une combinaison du vecteur électrique et sur la récupération de la chaleur perdue par les centrales thermiques.

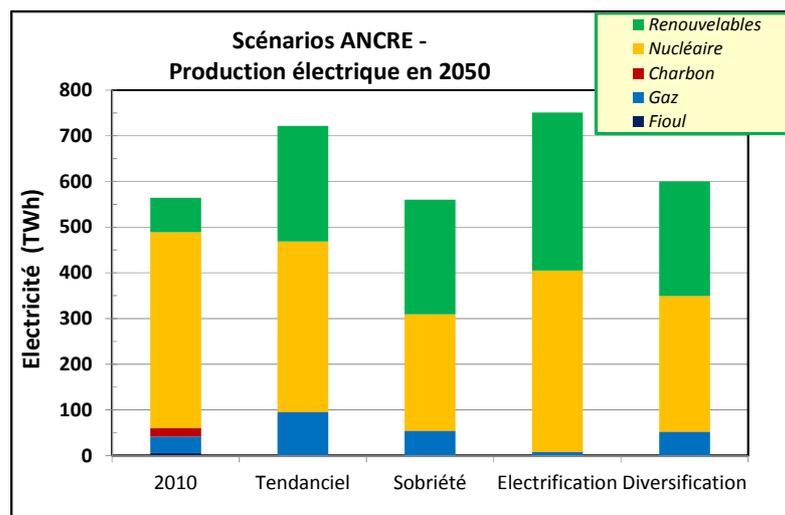


## a) La production d'électricité

La production d'électricité est déjà aujourd'hui à près de 90% décarbonée (< 65 gCO<sub>2</sub>/kWh)<sup>7</sup> grâce au nucléaire (77%) et aux renouvelables (13%). Les hypothèses d'évolution des sources d'énergie électrique communes à tous les scénarios sont les suivantes :

- Atteinte des objectifs nationaux en termes d'énergies renouvelables en 2020.
- Introduction d'énergies renouvelables dans le mix énergétique à un rythme encore plus soutenu après 2020, avec plus de 100 GWe en éolien et en solaire installés d'ici 2050.
- Elimination progressive mais totale des centrales au charbon et au fioul.
- Des centrales à cycle combiné gaz (CCG) sont introduites en tant que de besoin pour venir en soutien (« back-up ») aux énergies variables (éolien, solaire) lorsque celles-ci ne produisent pas, en complément des dispositifs destinés à optimiser le système énergétique (stockage, conversions entre vecteurs, gestion de la demande, développement des smartgrids)
- Réduction à 50% de la part du nucléaire dans la production électrique dès 2025 pour l'ensemble des scénarios à l'exception du scénario ELEC-V.

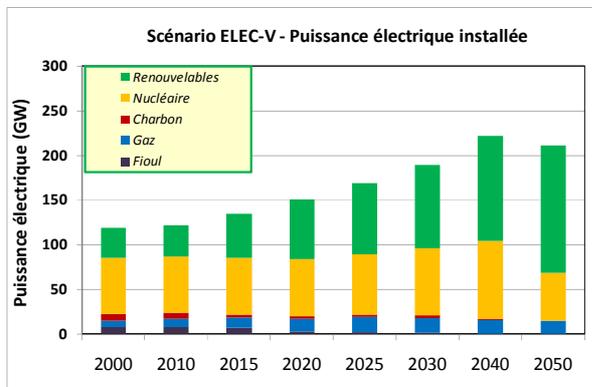
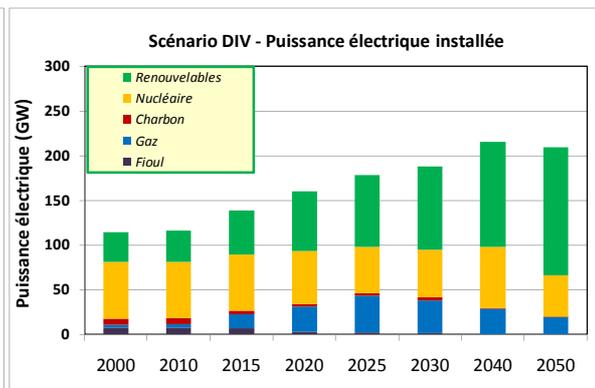
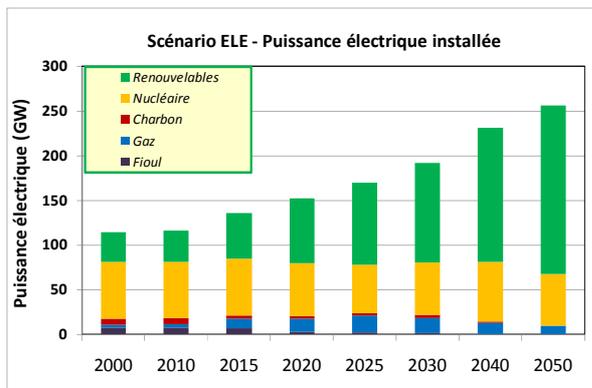
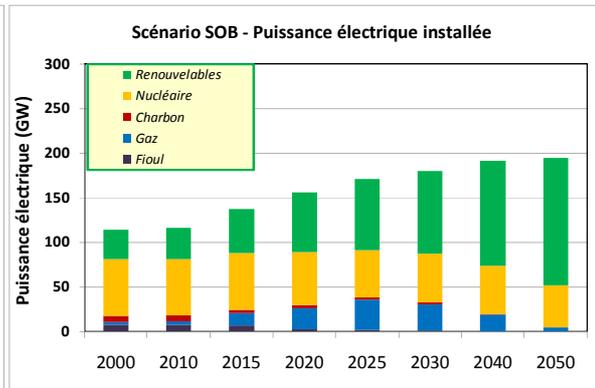
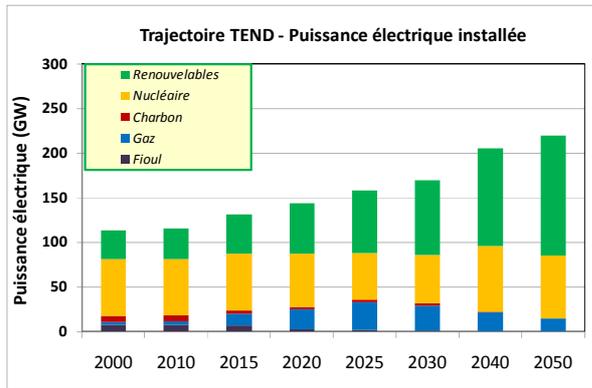
Les résultats sont reportés sur la figure suivante pour l'année 2050 pour les scénarios **SOB**, **ELE** et **DIV** :



## Puissance électrique installée

La majorité des énergies renouvelables électriques étant par essence variables (éolien, solaire, énergies marines), la puissance électrique installée va mécaniquement devenir bien supérieure à la puissance appelée par le réseau, même en période de pointe. La structure du mix électrique est dans tous les scénarios fortement dominée par la présence des énergies renouvelables ce qui imposera d'une part une gestion dynamique et intelligente des réseaux (« smart grids »), et d'autre part un renforcement des réseaux électriques sur le territoire national et des interconnexions avec nos voisins européens.

<sup>7</sup> Ce chiffre est à comparer à la valeur moyenne de 529 gCO<sub>2</sub>/kWh au niveau mondial, à celle des autres pays développés (OCDE 433 gCO<sub>2</sub>/kWh, Allemagne 461 gCO<sub>2</sub>/kWh) et à celle de la Chine (766 gCO<sub>2</sub>/kWh), chiffres fournis par les statistiques de l'AIE (Edition 2013 portant sur les chiffres de 2010). La France émet donc 6 à 7 fois moins de CO<sub>2</sub> pour sa production d'électricité que la plupart des autres grands pays du monde.



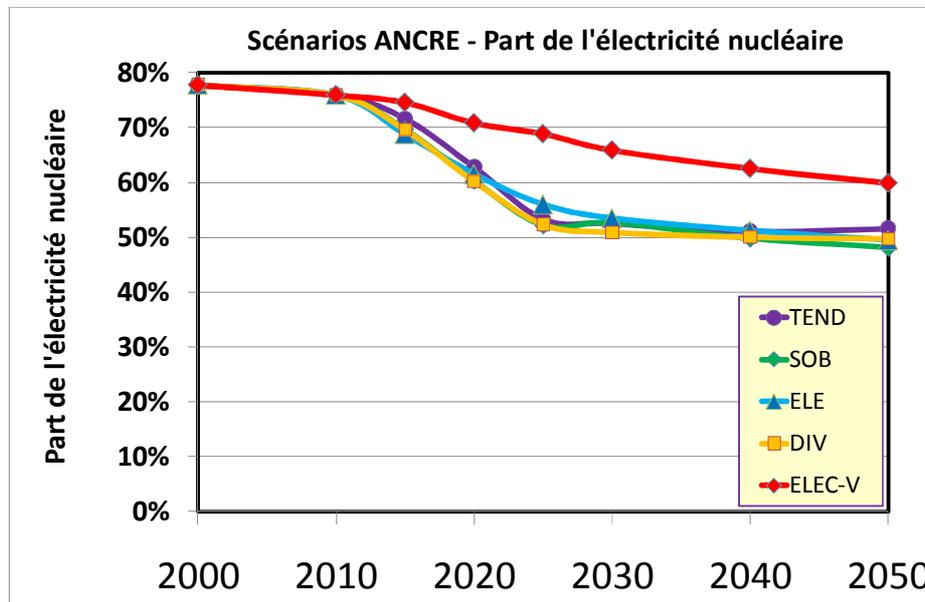
## La part du nucléaire dans la production d'électricité

Dans le scénario tendanciel, la réduction de la part du nucléaire dès 2025 impose un remplacement par des CCG, les énergies renouvelables ne générant pas suffisamment d'électricité et, de surcroît, leur production n'étant pas réalisée aux instants de fortes demandes (les soirées d'hiver). Ceci est également vrai dans les scénarios **SOB** et **DIV** mais dans une moindre mesure car la demande totale est réduite dans **SOB** et la diversification des sources comble une partie du manque nucléaire dans **DIV**. A contrario, dans **ELE**, seul le stockage massif d'électricité permettrait de lisser la demande sur l'année (le stockage estival étant restitué en hiver) s'affranchissant donc du recours au gaz.

Dans **ELEC-V**, la part du nucléaire n'est pas contrainte, elle évolue naturellement au fur et à mesure de l'introduction progressive des énergies renouvelables. Ce faisant, la part du nucléaire dans



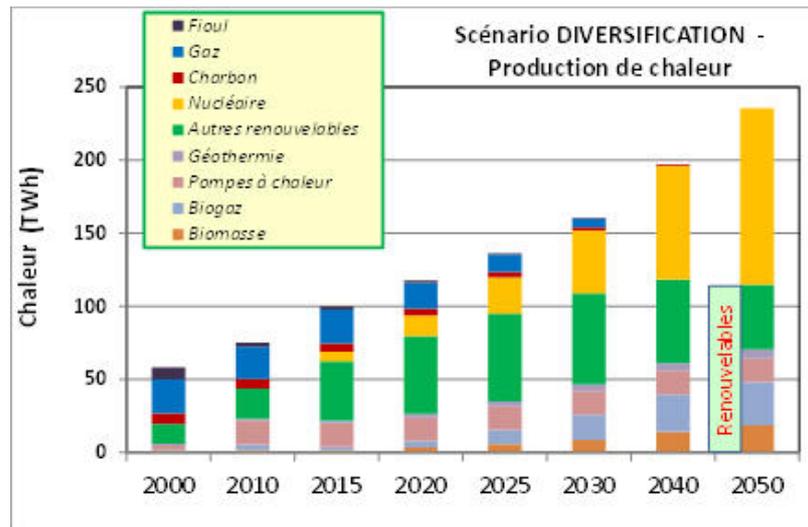
un scénario uniquement contraint par une place plus importante laissée aux énergies renouvelables se réduit progressivement pour descendre à 60% en 2050.



## *b) La production de chaleur*

La chaleur joue un rôle important dans tous les scénarios de l'ANCRE. En effet, plus de 50% de la consommation d'énergie finale étant à usage de chaleur, les scénarios s'attachent à prendre en compte les possibilités d'utilisation des chaleurs fatales (i.e. produite lors des processus industriels ou dans les centrales thermiques, notamment nucléaires). La production de chaleur et son utilisation sont promues dans tous les scénarios, avec notamment un développement accru des réseaux de chaleur. Seuls **DIV** et **ELEC-V** intègrent la cogénération nucléaire.

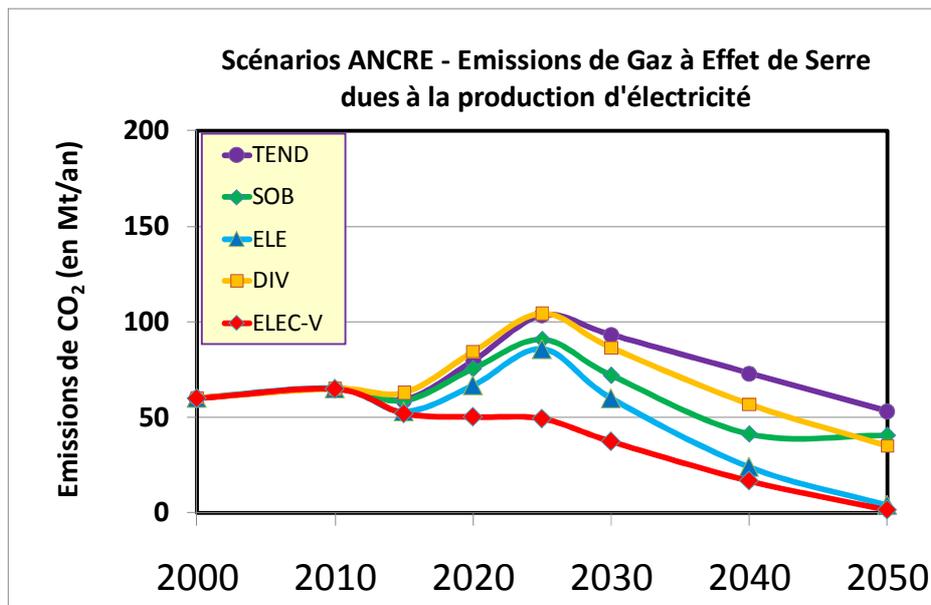
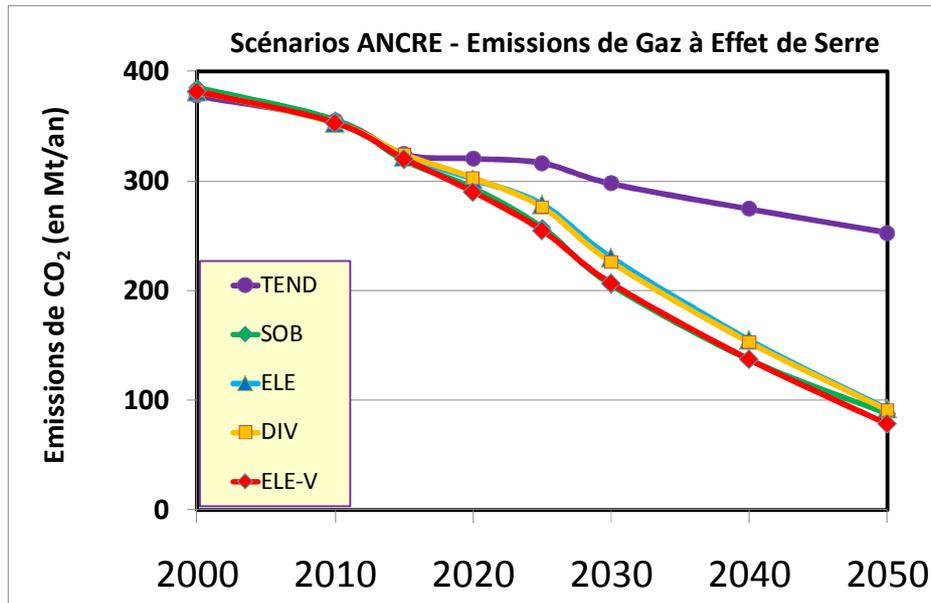
Dans le scénario diversification (**DIV**), une partie de la chaleur produite par les centrales électriques (nucléaires) est récupérée pour être injectée dans les réseaux de chaleur urbains. La chaleur issue des énergies renouvelables (biomasse, biogaz, pompes à chaleur, géothermie, solaire thermique, déchets et autres renouvelables) est également utilisée de manière importante pour alimenter les réseaux (réseaux classiques ou boucles d'eau tiède).



### 3.2.2. Bilan des émissions de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'énergie sont estimées à partir des consommations d'énergies fossiles. Pour l'évaluation « tous GES », le format utilisé est celui de la Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques – CCNUCC –, ce qui conduit à déduire les sources internationales (transports maritime et aérien) et à ajouter au CO<sub>2</sub>-énergie : le CO<sub>2</sub> non fossile (cimenteries, verrerie, sidérurgie, chaux, tuiles et briques) ; le CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (agriculture principalement, énergie, déchets, procédés industriels) ; les HFC (climatisation, aérosol), PFC (des productions d'aluminium) et SF<sub>6</sub> (industrie du magnésium, équipements électriques) ; les émissions fugitives (pertes dans le transport de gaz, déchets et solvants) (voir en Annexe la méthodologie de calcul des émissions de GES).

Tous les scénarios atteignent le Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> énergétique. La dynamique est cependant différente selon les cas. Notamment, la variante **ELEC-V** montre qu'il apparaît impossible de limiter le recours au nucléaire à 50% de l'énergie électrique en 2025 et de diminuer en même temps les émissions de la production d'électricité. Ce phénomène vient du besoin de « back-up » en énergie fossile (gaz) pour palier la variabilité des énergies renouvelables variables (ERV) installées à la place du nucléaire. A cette date rapprochée, il n'apparaît pas possible de développer des technologies permettant d'éviter cet inconvénient. C'est ce qui est représenté dans la figure ci-dessous.





## 4. L'évaluation des scénarios de l'ANCRE

Le processus du Débat National sur la Transition Energétique (DNTE), qui s'est déroulé au cours du premier semestre 2013, a fait apparaître la nécessité d'une évaluation rigoureuse des scénarios énergétiques, à mener dans le cadre d'une approche multicritère. Dès le début de ses travaux de prospective à l'automne 2012, l'ANCRE avait anticipé ce besoin d'une évaluation multicritère en identifiant un jeu de critères prenant en considération les préoccupations économiques et sociales, environnementales-sociétales, et enfin de politique de recherche et d'innovation.

Cet effort d'analyse répond notamment aux recommandations de la commission Sen-Stiglitz-Fitoussi préconisant l'instauration d'une "culture du tableau de bord" pour l'évaluation des différentes politiques publiques. En effet les recherches en économie du développement durable montrent que le plus souvent il est impossible de ramener la comparaison des politiques alternatives à un critère unique d'évaluation et a fortiori du seul critère économique. Il faut donc examiner les caractéristiques et conséquences des scénarios à la lumière de plusieurs indicateurs, dont certains pourront être quantifiés, y-compris parfois en termes économiques, alors que d'autres ne pourront être appréciés que de manière qualitative.

Les efforts dans ce sens menés, soit dans le cadre du DNTE soit dans le cadre des travaux de l'ANCRE, témoignent qu'il y a encore d'énormes progrès à accomplir pour améliorer la capacité des organismes publics à mettre en œuvre des procédures de mesure rigoureuse des différents impacts des politiques énergétiques. Ce constat donne d'ailleurs des indications sur ce qui pourrait constituer un programme de recherche sur les outils d'évaluation des conséquences socio-économiques des choix de politique énergétique.

Les travaux de l'ANCRE adoptent cette démarche mais ne constituent donc qu'une approche partielle du problème et, on le verra ci-dessous relèvent très souvent d'une appréciation qualitative. Ils permettent néanmoins une comparaison des différentes options qui devra être précisée et approfondie dans des recherches futures.

### 4.1. Les critères d'ordre économique

Des valeurs ont été compilées pour les secteurs du bâtiment, des transports et de la production d'énergie. **L'ANCRE attire tout particulièrement l'attention du lecteur sur les précautions à employer dans la lecture de ces données**, notamment sur les questions de périmètres (« emplois concernés », « gain net par rapport à un scénario de référence », « gain net par rapport à aujourd'hui », « coût complet », « surcoût », etc.).

#### 4.1.1. Trajectoire d'investissement

Au stade actuel, l'étude ne permet pas de donner un coût consolidé en termes d'investissements. En effet, sur chacun des secteurs, les périmètres retenus sont trop hétérogènes pour qu'un tel calcul ait un sens. Par exemple, le secteur du résidentiel-tertiaire prend en compte la rénovation thermique mais ne prend pas en compte la construction neuve de bâtiments (et les éventuels surcoûts dus à une réglementation thermique contraignante). Dans le secteur des transports au contraire, l'achat d'un véhicule neuf est comptabilisé (pour son montant total).



## a) Le secteur du résidentiel-tertiaire

Les simulations d'évolution des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment sont réalisées au moyen d'un tableur représentant, d'une part la structure du parc de bâtiment, et d'autre part différents scénarios d'évolution des performances (dispositifs de chauffage et bâti) et des mix énergétiques. Les principales variables prises en compte sont :

- Type de bâtiment (maison individuelle, logement collectif, tertiaire).
- Dynamique du parc (destruction, construction neuve).
- Scénarios de rénovation (volume de rénovation lourde / légère).
- Performances thermique (neuf, rénové lourd / léger).
- Evolution des parts de marché des énergies (chauffage + ECS).
- Besoins en investissement pour rénover le parc de bâtiments dans les différents scénarios.

Les besoins d'investissement qui en découlent sont de l'ordre de 900 G€ sur l'ensemble de la période (2010-50) pour le scénario **SOB** pour lequel le volume de rénovation (on rénove la totalité du parc existant en rénovation lourde) et le niveau de performance requis sont les plus élevés. En moyenne annuelle, les besoins en investissement seraient donc de l'ordre de 4 G€ dans le scénario de référence (tendanciel), 12 G€ dans **ELE** et **DIV** et 24 G€ dans **SOB**.

### *Investissements en rénovation énergétique dans le résidentiel-tertiaire, selon les scénarios et par période*

R&T	2014-19	2020-29	2030-49	Moyenne	Cumulé
Durée de la période	6 ans	10 ans	20 ans		36 ans
	G€ <sub>2012</sub>	G€ <sub>2012</sub>	G€ <sub>2012</sub>	G€ <sub>2012</sub> /an	G€ <sub>2012</sub>
TEND	27	40	88	4,3	159
SOB	155	236	475	24	889
ELE	68	105	275	12,4	459
DIV	66	106	279	12,5	462

Ces montants d'investissement peuvent être rapprochés des dépenses d'entretien-amélioration déjà consenties annuellement, à la fois par les ménages et les bailleurs sociaux : 40 G€/an pour un parc total d'environ 3 milliards de m<sup>2</sup> (y.c. vacant et secondaire) et par les acteurs du tertiaire : 30 G€/an pour un peu moins de 1 Mds m<sup>2</sup>. Seule une part de ces dépenses a un impact sur l'efficacité énergétique ; l'enquête OPEN estime entre 12 et 15 G€ les investissements annuels ayant un impact énergétique sur le périmètre du logement privé ; les dépenses non-énergétiques associées à ces investissements seraient d'après l'enquête de l'ordre de 30% des investissements énergétiques.

Avec les hypothèses considérées ici pour les coûts de la rénovation, un objectif de 50% de gain sur la rénovation énergétique des bâtiments (individuel ou collectif) antérieurs à 1974 serait proche du coût-efficacité. L'objectif de 60% retenu pour les scénarios **ELE** et **DIV** suppose que des gains d'apprentissage pourront être enregistrés sur les coûts de rénovation modifiant ainsi le niveau d'objectif correspondant à l'optimum économique (à moduler selon l'énergie de chauffage).

Avec les hypothèses de coûts actuels, les objectifs de rénovation lourde fixés dans le scénario **SOB** à 70% de réduction des consommations se situent au-delà de l'objectif coût-efficace, si on ne considère que les seuls gains directs associés à la rénovation thermique (avec des temps de retour voisins de 40 ans dans ces mêmes bâtiments).



La prise en compte des barrières à l'investissement (asymétrie d'information, absence de garantie de performance, incertitude sur l'évolution du prix des énergies, etc.) dégrade fortement le potentiel accessible avec une rentabilité économique acceptable pour les ménages.

*b) Le secteur des transports*

L'évolution des dépenses a été évaluée à l'aide d'un modèle TIMES-France Transport. Plusieurs types de dépenses ont été considérés (voir les tableaux détaillés ci-dessous) : les dépenses d'investissements dans les infrastructures routières, y compris équipements et bornes de recharge pour le développement des véhicules électriques, et ferroviaires, dans les installations de production de nouveaux carburants (biocarburants liquides ou gazeux, hydrogène), enfin les dépenses liées à l'achat de véhicules ferroviaires, mais aussi routiers (VP, VUL, PL et bus).

**Scénario TEND**

G€2012	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	Cumul sur la période 2012-2050	Moyenne annuelle
Infrastructures routes*/rail	1,4	4,8	7,5	17,6	31,4	0,8
Parc de transport en commun route	2,9	10,2	9,5	8,5	31,0	0,8
Parc de transport en commun rail	12,0	11,6	15,6	15,9	55,1	1,5
Parc transport de marchandises rail	-	4,3	2,4	1,9	8,7	0,2
Installations production biocarburants	0,0	0,7	2,2	3,6	6,5	0,2
<b>Dépenses totales (yc bus, mais hors parc VP, VUL et PL)</b>	<b>16,3</b>	<b>31,6</b>	<b>37,2</b>	<b>47,5</b>	<b>132,7</b>	<b>3,5</b>
Parc VP-VUL	650,9	786,7	988,1	1 155,3	3 581,0	94,2
Parc PL transport de marchandises	40,7	47,9	55,6	59,3	20,3	5,4
<b>Dépenses totales parc routier (hors transport en commun)</b>	<b>691,5</b>	<b>834,6</b>	<b>1 043,6</b>	<b>1 214,7</b>	<b>3 784,4</b>	<b>99,6</b>

\*Y compris bornes de recharge pour véhicules électriques

**Scénario SOB**

G€2012	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	Cumul sur la période 2012-2050	Moyenne annuelle
Infrastructures routes*/rail	1,0	3,1	3,9	4,4	12,4	0,3
Parc de transport en commun route	8,3	18,3	20,0	24,2	70,7	1,9
Parc de transport en commun rail	29,5	34,4	29,1	31,0	124,0	3,3
Parc transport de marchandises rail	3,3	22,8	13,1	1,3	40,5	1,1
Installations production biocarburants	0,0	0,6	2,2	3,5	6,3	0,2
<b>Dépenses totales (yc bus, mais hors parc VP, VUL et PL)</b>	<b>42,2</b>	<b>79,2</b>	<b>68,3</b>	<b>64,3</b>	<b>254,0</b>	<b>6,7</b>
Parc VP-VUL	453,9	448,1	432,5	390,2	1 724,6	45,4
Parc PL transport de marchandises	36,6	33,2	34,2	33,1	137,1	3,6
<b>Dépenses totales parc routier (hors transport en commun)</b>	<b>490,5</b>	<b>481,3</b>	<b>466,7</b>	<b>423,3</b>	<b>1 861,8</b>	<b>49,0</b>

\*Y compris bornes de recharge pour véhicules électriques



## Scénario ELE et ELEC-V

G€2012	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	Cumul sur la période 2012-2050	Moyenne annuelle
Infrastructures routes*/rail	3	5	15	43	66	2
Parc de transport en commun route	3	7	3	3	15	0
Parc de transport en commun rail	12	12	16	16	55	1
Parc transport de marchandises rail	-	4	2	2	9	0
Installations prod. biocarburants et H2	-	2	15	26	43	1
<b>Dépenses totales (hors parc VP, VUL et PL)</b>	<b>18</b>	<b>30</b>	<b>51</b>	<b>89</b>	<b>188</b>	<b>5</b>
Parc VP-VUL	710	873	1 300	1 671	4 554	120
Parc PL transport de marchandises	41	69	98	118	326	9
<b>Dépenses totales parc routier (hors transport en commun)</b>	<b>751</b>	<b>941</b>	<b>1 398</b>	<b>1 789</b>	<b>4 880</b>	<b>128</b>

\*Y compris bornes de recharge pour véhicules électriques

## Scénario DIV

G€2012	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	Cumul sur la période 2012-2050	Moyenne annuelle
Infrastructures routes*/rail	1,8	2,9	7,9	19,5	32,1	0,8
Parc de transport en commun route	2,3	10,0	8,7	7,9	28,9	0,8
Parc de transport en commun rail	11,5	10,9	14,1	14,1	50,6	1,3
Parc transport de marchandises rail	-	4,3	2,4	1,9	8,7	0,2
Installations production biocarburants	0,3	2,1	62,1	102,6	167,2	4,4
<b>Dépenses totales (yc bus, mais hors parc VP, VUL et PL)</b>	<b>16,0</b>	<b>30,1</b>	<b>95,2</b>	<b>146,2</b>	<b>287,5</b>	<b>7,6</b>
Parc VP-VUL	681,0	832,0	1 040,7	1 223,3	3 777,0	99,4
Parc PL transport de marchandises	41,9	51,6	62,5	72,7	228,7	6,0
<b>Dépenses totales parc routier (hors transport en commun)</b>	<b>722,8</b>	<b>883,6</b>	<b>1 103,2</b>	<b>1 296,0</b>	<b>4 005,7</b>	<b>105,4</b>

\*Y compris bornes de recharge pour véhicules électriques

Pour les deux scénarios **SOB** et **ELE**, les dépenses qui seront probablement plus favorisées par la collectivité, c'est à dire celles liées aux infrastructures routières et ferroviaires, aux équipements ferroviaires – transport de personnes et de marchandises – et aux bus, sont supérieures à celle du scénario **TEND** (ou scénario de référence). Les augmentations les plus importantes sont observées dans le scénario **SOB**, avec un poids particulier des investissements liés au développement des transports en commun ferroviaires et routiers et du fret ferroviaire. Vient ensuite le scénario **ELE**, avec un poids particulier des équipements et bornes de recharge (notamment rapides) pour le développement des véhicules électriques et véhicules hydrogènes.

Le scénario **DIV** est marqué par des investissements importants dans la construction d'unités de production de biocarburants (liquides et gazeux), soit plus de 4G€/an en moyenne sur la période 2012-2050.

Sur la période 2012-2050, les dépenses liées à l'achat des véhicules routiers (VP, VUL et PL, hors bus) considérées comme principalement prises en charge par les ménages et les entreprises sont



supérieures dans le scénario **ELE** à celles du scénario **TEND** (+ 30 %), alors qu'elles restent d'un montant comparable pour le scénario **DIV** (+5%) et diminuent fortement par rapport à **TEND** dans le scénario **SOB** (-50 %). Pour cette dernière trajectoire, il est important de rappeler que les hypothèses faites en terme de réduction de la mobilité individuelle et de développement massif de solutions de type autopartage, conduisent à une diminution par deux en 2050 du parc de véhicules, par rapport à son niveau actuel.

Dans le scénario **ELE**, cette forte augmentation est principalement imputable à une diffusion volontariste de véhicules électriques et à hydrogène qui présentent un surcoût net, du moins dans les premières années de leur mise sur le marché. La durée de vie plus faible des véhicules dans le parc, liée notamment à la nécessité d'accélérer la pénétration de nouvelles technologies-véhicule plus performantes énergétiques ou moins émettrices de CO<sub>2</sub> est également une des explications.

Il convient néanmoins de souligner que les incertitudes sur ces évaluations restent importantes. Les dépenses d'achat de véhicules sont par exemple très fortement dépendantes des réductions de coût qui seront possibles, ainsi que du kilométrage annuel alloué aux différentes technologies. Pour illustrer ces incertitudes, le maintien des prix d'achat de l'ensemble des véhicules particuliers avec une réduction de 20% du prix des batteries des véhicules électriques, accompagné d'un kilométrage annuel des différentes technologies-véhicule qui converge vers 15 500 km/an à horizon 2050 dans le scénario **DIV**, induit une réduction des investissements moyen annuel entre 2012 et 2050 de 11 milliards d'euros, soit une réduction de 11%.

### *c) Le secteur de la production d'énergie*

Dans le scénario **ELE**, l'investissement dans le secteur électrique sera supérieur aux autres scénarios, mais il pourrait être partiellement compensé dans un premier temps par un rallongement de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires (ou par un facteur de charge plus élevé). Le développement rapide des énergies renouvelables variables, alors qu'elles n'ont pas encore pleinement descendu leur courbe d'apprentissage, pourrait constituer un facteur d'augmentation des investissements à moyen terme, mais ce phénomène pourrait disparaître à plus long terme. L'intégration d'une plus grande part d'EnR variables pourra également impliquer des coûts significatifs de développement/renforcement du système électrique (réseaux intelligents, interconnexions, stockages), et de nouveaux outils de gestion de la demande d'électricité (GTB, smartgrids...).

Pour le scénario **DIV**, les investissements pour développer les réseaux et pour mobiliser la biomasse (pour la collecte avec mécanisation de la récolte, dessertes forestières, systèmes de câbles, moyens en télédétection, plateformes, etc.) n'ont pas été calculés à ce stade mais ils pourraient être importants. Pour le transport de la chaleur depuis les centrales électriques (hypothèse de cogénération), il faudra à la fois étendre le réseau pour desservir au mieux la population, tout en tenant compte de la baisse du besoin en chaleur dans les logements (rénovation, meilleurs équipements). Le scénario **SOB** serait le scénario demandant le moins d'investissements du côté de l'offre.

La quantification des investissements nécessaires à la réalisation des scénarios ANCRE pour le secteur électrique est réalisée à l'aide d'un tableur qui les calcule à partir :

- i. des productions d'électricité par technologie ;
- ii. des capacités installées par technologies ;
- iii. des coûts des technologies regroupées dans la base de données de coûts technologiques (base de données TECHPOL), les investissements en capacité de production, les coûts liés à la sûreté, le cas échéant à la prolongation des centrales nucléaires, ainsi que les coûts de production et ce chaque année.

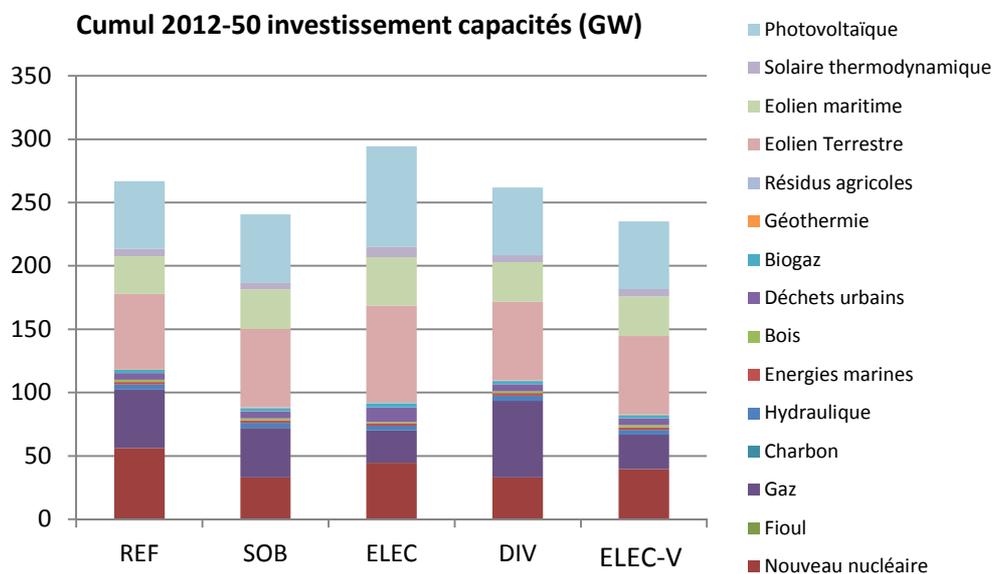


Les investissements nécessaires sont calculés selon l'hypothèse d'une durée d'exploitation des centrales de 50 ans pour les 50 GW le plus récents, les 13 autres GW de capacités nucléaires sont arrêtés au bout d'une durée de fonctionnement de 40 ans.

## Besoins en capacités de production cumulées par décennie, sur la période et moyenne annuelle (GW)

	2012-20	2020-30	2030-40	2040-50	2012-50	moyenne annuelle
<b>TEND</b>	43	49	70	106	267	7,0
<b>SOB</b>	48	47	47	98	241	6,3
<b>ELEC</b>	44	60	72	118	294	7,7
<b>DIV</b>	52	50	65	94	262	6,9
<b>ELEC-V</b>	39	44	65	87	235	6,2

## Détail par technologie

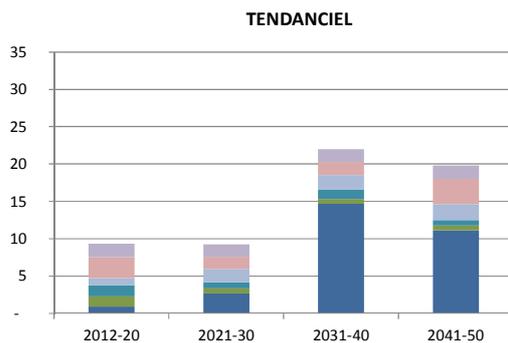


Le coût total d'investissement dans les capacités de production est le plus bas pour **SOB** et le plus élevé pour **ELE**. Dans tous les cas, la décennie 2030-40 devra mobiliser de gros investissements dans de nouvelles capacités de production, avec une grande partie de ces investissements dédiés à la construction d'EPR.

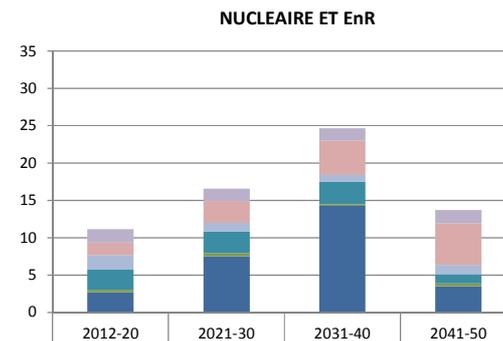
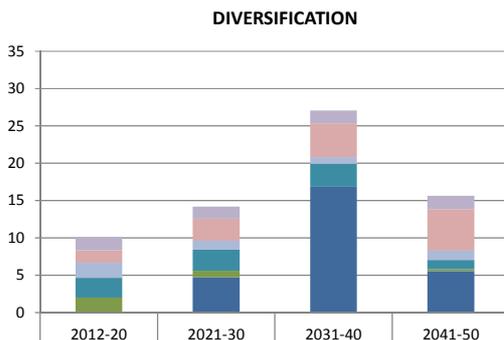
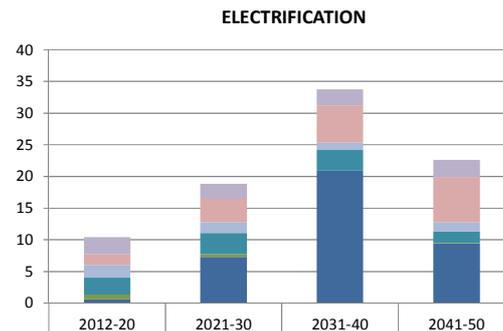
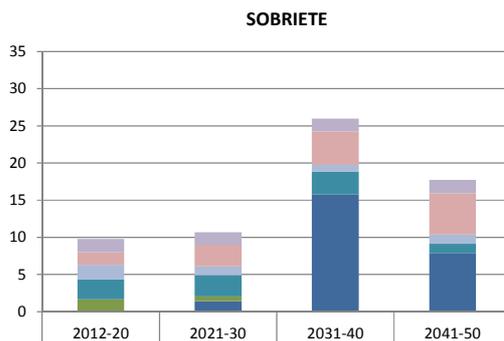


## Investissement total sur la période 2012-2050 (G€)

	TEND	SOB	ELEC	DIV	ELEC-V
<b>Investissement cumulé 2012-2050 (G€)</b>	589	468	606	491	499



## Investissements moyens annuels en capacité de production (Mrds €)



### 4.1.2. Coûts et prix de l'énergie

#### a) Les coûts de système associés à la production d'électricité

La question des coûts systémiques associés à la pénétration des énergies renouvelables variables constitue un problème central dans l'évaluation économique des systèmes électriques dans la transition énergétique, et dans la détermination fiable d'un coût de production de l'électricité. Ce problème renvoie en effet au nécessaire équilibrage en temps réel de l'offre et de la demande d'électricité lorsque la contribution des sources non commandables (dispatchables) devient non



marginale. Alors que les dispositifs de *Demand Response* ou de stockage d'électricité ne sont pas encore développés à grande échelle, on considère que les coûts supplémentaires occasionnés par la pénétration des ERV sont principalement de trois ordres :

1. Les coûts d'ajustement des capacités de production (*adequacy*) lorsque les ERV ne produisent pas afin d'assurer les capacités de réserve.
2. Les coûts de l'équilibrage offre/demande (*balancing*) qui va entraîner des montées et descente en puissance sur des profils nouveaux et avec des pertes d'efficacité/coûts supplémentaires.
3. Les coûts supplémentaires de développement des réseaux, pour le raccordement des nouvelles capacités de production ou le transport d'électricité d'origine renouvelable vers les centres de consommation.

La complexité des questions soulevées par ces nouvelles configurations de réseau est extrême car il s'agit de faire face à la gestion optimisée d'au moins trois aléas : de demande, de production éolienne, de production solaire (photovoltaïque). Cela en tenant compte de la dimension territorialisée des grandes d'infrastructures de transport.

Une réflexion a été engagée au sein de l'ANCRE afin de progresser dans la compréhension et la capacité d'évaluation économique des nouvelles caractéristiques des systèmes électriques. Cette réflexion devrait conduire à des progrès au plan des méthodes, éventuellement même de la modélisation. Mais dans le cas des scénarios produits en 2013, il n'a pas été possible de mener une analyse détaillée des coûts systémiques des renouvelables.

Une approche simplifiée peut consister à s'appuyer sur des évaluations produites par RTE pour des scénarios contrastés de pénétration des ERV en France, à l'horizon 2030. Dans le "Bilan prévisionnel 2012" pour les scénarios à 2030, il apparaît par exemple :

- dans le scénario Référence (65% de nucléaire) une production totale de 589 TWh, dont 58 d'électricité éolienne, 22 d'électricité solaire et 4 d'énergies marines, soit 14% d'ERV ;
- dans le scénario Nouveau Mix (50% de nucléaire) la production totale est de 557 TWh dont 77 d'éolien, 33 de solaire et 9 d'énergies marines, soit 21% d'ERV.

Au scénario Référence sont associés des investissements totaux de réseaux de 35 G€ pour les interconnexions entre 2013 et 2030. Pour le scénario Nouveau Mix apparaissent pour la même période 40 G€ d'investissements d'interconnexion, 8 G€ de raccordement des nouvelles sources, 2 G€ liés à des déclassements accélérés. Soit un écart de 15 G€ dans le scénario Nouveau Mix à associer au passage de 14 à 21% d'ERV.

L'interpolation/extrapolation linéaire de cette relation à d'autres scénarios de pénétration des ERV ne constitue évidemment qu'une estimation assez grossière. Pourtant elle permet de construire des ordres de grandeur raisonnés pour estimer une partie des coûts systémiques des ERV (en tous cas les coûts d'investissement, hors *balancing* lié aux effets de rampe en exploitation). Pour certains observateurs, la montée en puissance des ERV peut dans certains cas, notamment lorsque les réseaux MT doivent être profondément reconfigurés pour permettre des flux ascendants significatifs, induire des évolutions non linéaires (cas de l'Allemagne).

Pour l'évaluation du coût moyen de production de l'électricité, on peut donc considérer qu'une fonction linéaire calée sur les estimations indiquées ci-dessus constitue une évaluation a minima des coûts systémiques de la pénétration des renouvelables. C'est ce qui a été retenu en première approche.



**Scénario SOB** : Une cause d'incertitude majeure sur les coûts de cette option est l'engagement d'efforts très importants en termes d'efficacité et de sobriété. Pour atteindre cette trajectoire très sobre, il sera nécessaire de mettre en place des dispositions réglementaires ou technologiques, des prix élevés de l'énergie, mais aussi des actions pédagogiques et de formation. Il convient en particulier de prendre en compte la possible hausse des coûts de rénovation compte-tenu du niveau de performance visé : dans bien des cas les coûts augmenteront rapidement lorsqu'il faudra aller chercher les derniers kWh économisés. Il faudra prendre en compte la difficulté à coupler rénovation et augmentation des prix, en particulier des catégories de ménages les plus défavorisées.

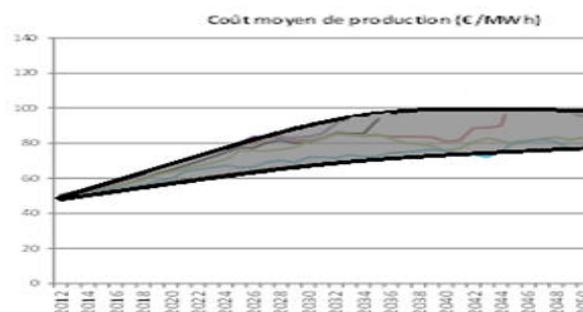
**Scénario ELE** : les hypothèses concernant le secteur électrique sont volontaristes en termes de pénétration des ERV (Energies Renouvelables Variables), et sont finalement relativement proches entre les scénarios. Les calculs déjà disponibles en termes de coût de production de l'électricité amènent à penser que le coût du MWh serait de l'ordre de 50% supérieur en 2030 à ce qu'il est aujourd'hui. D'autre part ce scénario suppose un investissement supplémentaire important pour l'électrification du parc automobile, coûteux à la fois au plan du véhicule (surcoût des batteries dans les premiers temps) et pour les infrastructures de recharge. Cependant le scénario ELE pourrait ne pas déboucher sur un coût supérieur aux autres dès lors que les coûts du nucléaire et des énergies renouvelables ainsi que ceux de système associés seront bien maîtrisés et que leur complémentarité est gérée de manière efficace. Des coûts seront aussi à mieux évaluer dans les années qui viennent, pour les capacités de stockage et les réseaux intelligents.

**Scénario DIV** : Ce scénario est lui aussi très innovant du fait de la diversité et de l'originalité des systèmes énergétiques locaux qu'il suppose. A ce stade, nous ne disposons pas pour notre pays d'évaluations précises des coûts induits par les processus de diversification des énergies, notamment en termes de réseaux de chaleur, d'intégration de gaz d'origine biologique au réseau de gaz et de mobilisation massive de biomasse notamment lignocellulosique pour les carburants (investissements amont de la filière). Le coût de la collecte de la biomasse et la structuration des filières est un enjeu primordial, tout comme le niveau de performance technique et d'efficacité économique de systèmes énergétiques locaux intelligents multi-vecteurs, combinant éventuellement électricité, gaz et chaleur.

## *b) Les coûts de production de l'électricité*

Les coûts de production sont calculés en tenant compte des coûts fixes inhérents à chaque génération de capital, des coûts variables annuels, des coûts de prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes, des coûts de sûreté pour le nucléaire et des coûts du carbone.

Les coûts moyens de production augmentent significativement de 50 €/MWh en 2012 à environ 80-100 €/MWh en 2050 dans les scénarios **SOB**, **ELE**, **DIV** et **ELEC-V**. Un travail est actuellement en cours pour pouvoir mieux quantifier les différences entre scénarios en termes de coûts de production.





### c) Prix et coût des énergies fossiles à l'importation

Le travail de scénarisation mené par l'ANCRE suppose une croissance continue du prix international du pétrole. Celui-ci atteint en termes réels 130 \$/bl en 2020 et 215 \$/bl en 2050, soit 100 €/bl en 2020 et 165 €/bl en 2050 (en faisant l'hypothèse d'un maintien à un niveau constant sur toute la période de la parité euro/dollar). Cette évolution du prix du pétrole est supérieure à celle donnée par l'AIE dans les derniers scénarios présentés dans le World Energy Outlook de 2013, mais elle reste bien inférieure aux trajectoires envisagées dans les récents Working papers du FMI ("*The future of oil: geology versus technology*", 2012) et de l'OCDE ("*The price of oil: Will it start rising again ?*" Working paper n° 1031).

Le prix du gaz naturel en Europe augmente également, mais ne suit pas l'accroissement du prix du brut. On suppose en effet sur la période une montée de la part *spot* au détriment du prix indexé sur le pétrole ou les produits pétroliers. Une part *spot* de 70 % est retenue en 2020 et de plus de 90 % au-delà (la formule utilisée par la CRE en France retient désormais une part de 46 % depuis juillet 2013 ; elle était nulle en 2010).

Le prix spot est supposé stable jusqu'en 2020, avant d'évoluer légèrement à la hausse au-delà. Le prix du gaz naturel en Europe atteint 12 \$/MBtu (31 €/MWh) en 2030 et s'accroît régulièrement jusqu'à 14 \$/MBtu (36 €/MWh) en 2050.

	2010	2030	2050
<b>Prix du pétrole (€/baril)</b>	60	115	165
<b>Prix du gaz naturel en Europe (€/MWh)</b>	21	31	36

### d) Prix des carburants

L'évolution du prix des carburants, est indiquée par rapport à 2010, à TICE constante et taxe carbone comprise (environ 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030 et 240 €/tCO<sub>2</sub> en 2050 sauf SOB avec 300€/t CO<sub>2</sub>, cf annexe). Il faut noter que le prix des carburants a augmenté d'environ 30% entre 2010 et 2012, cette augmentation expliquant la majeure partie de l'augmentation indiquée entre 2010 à 2015.

		2010	2015	2020	2025	2030	2040	2050
TEND	<b>Carburants essence</b>	100%	141%	149%	170%	190%	231%	272%
	<b>Carburants gazole</b>	100%	141%	149%	170%	190%	231%	272%
SOB	<b>Carburants essence</b>	100%	143%	153%	179%	206%	257%	310%
	<b>Carburants gazole</b>	100%	143%	154%	181%	210%	262%	317%
ELE	<b>Carburants essence</b>	100%	143%	152%	178%	203%	260%	300%
	<b>Carburants gazole</b>	100%	143%	153%	179%	206%	266%	305%
	<b>Carburants hydrogène</b>	100%	108%	104%	102%	93%	86%	85%
DIV	<b>Carburants essence</b>	100%	142%	152%	177%	202%	255%	289%
	<b>Carburants gazole</b>	100%	143%	153%	179%	204%	260%	291%
ELEC-V	<b>Carburants essence</b>	100%	142%	152%	177%	202%	255%	289%
	<b>Carburants gazole</b>	100%	143%	153%	179%	204%	260%	291%

#### 4.1.3. Bilan économique pour les ménages

L'évolution des prix de l'énergie au consommateur dépend d'un jeu d'hypothèses en cascade sur les prix internationaux des énergies importées, les coûts des équipements de production-conversion-mise à disposition de l'énergie au consommateur et enfin de la fiscalité, paramètre majeur du pilotage de la transition énergétique. Le rôle important accordé à la rénovation thermique des bâtiments dans tous les scénarios oblige aussi à considérer le financement de ces investissements comme faisant partie de la facture énergétique avec, le cas échéant, le remboursement des annuités/mensualités correspondantes.

De même dans les nouveaux systèmes de transport, les dépenses éventuelles de location des batteries doivent être prises en compte. Le concept de facture énergétique doit donc être élargi pour prendre en compte l'ensemble des dépenses de fourniture des services énergétiques, abonnement, énergie, fiscalité spécifique (y-compris environnementale), dépenses d'investissement, location d'équipements...

On conçoit donc la complexité des jeux d'hypothèses à élaborer pour apprécier l'impact des scénarios sur cette facture énergétique et les incertitudes qui lui sont liées.

#### Dépenses énergétiques totales des ménages (€ constants)

€/an	2010	2020	2030	2040	2050
TEND	2790	3333	3204	3277	3400
SOB	2831	3042	2819	2464	2408
ELE	2824	3331	3336	3041	2627
DIV	2836	3213	3047	2871	2473
ELEC-V	2824	3113	2979	2859	2540

#### 4.1.4. Emplois, filières professionnelles et activité économique

Les scénarios reposent tous sur une dynamique d'activité qui reste soutenue (croissance du PIB de l'ordre de 1,7%/an en moyenne jusqu'à 2050), et un accroissement notable de la population (75 millions en 2050). De plus tous les scénarios supposent un maintien et même une croissance des productions des branches industrielles, à de très rares exceptions près (sidérurgie, ciment, plâtre et chaux). Le cadre d'hypothèse n'est donc pas celui d'une désindustrialisation.

Cependant nous n'avons pas jugé pertinent, compte-tenu des moyens disponibles, d'évaluer le contenu en emplois consolidé par scénario. Ceci supposerait en effet d'étudier pour chaque scénario les trois grandes catégories qu'il convient toujours de distinguer : l'emploi direct de la branche, l'emploi indirect pour ses fournisseurs d'équipement ou de services, enfin l'emploi induit via les effets de bouclage macroéconomique.

De même, les emplois potentiellement créés devraient toujours être mis en balance avec les emplois potentiellement détruits dans les branches impactées négativement (par exemple dans l'industrie automobile dans certains scénarios). L'évaluation de ces effets sur l'emploi constitue une opération délicate qui nécessite de disposer d'un modèle macroéconomique, tant les effets induits via les prix jouent un rôle important (liens prix-salaires-prix, compétitivité, conséquences de la dette...). Un exercice de ce type est en cours au sein du CGSP au moment de la rédaction de ce rapport. Le scénario **DIV** en est une des références. Nous renvoyons le lecteur à ses futures conclusions.



Cependant, les opportunités offertes par les scénarios de transition énergétique sont potentiellement porteuses d'emplois à travers de nouvelles technologies performantes dans de nombreux domaines, dont certains sont stimulés dans tous les scénarios : efficacité énergétique dans tous les secteurs, gestion de la demande, smartgrids, stockage, énergie solaire, éolienne, géothermie, véhicules électriques et hybrides, énergie hydrolienne mais aussi organisation industrielle, écoparcs, villes intelligentes... L'enjeu principal sera de localiser ces emplois, en particulier ceux liés à l'investissement et aux équipements échangeables internationalement, dans notre pays ou en Europe.

Concernant le scénario **SOB**, le premier impact de ce scénario, qui suppose un effort considérable pour la réhabilitation énergétique du parc de bâtiments existants est évidemment celui, positif, sur le secteur du bâtiment, avec toutefois la nécessité d'un accompagnement adapté sur la formation aux nouvelles techniques et la gestion des qualifications ; par ailleurs dans ce scénario, on doit disposer, grâce à la mise au point par la recherche, de technologies intelligentes et de services exportables qui permettent les trajectoires les plus sobres (notamment écoconception, modélisation, gestion de la demande...). Un potentiel de développement important se fera jour si ces technologies sont essentiellement françaises. On ne peut toutefois pas exclure que le secteur de la réhabilitation thermique, fortement intensif en main d'œuvre dans une première période, s'industrialise progressivement avec pour conséquence une possible évolution des qualifications mais également une moindre création nette d'emplois.

Le scénario **ELE** dispose d'un secteur électrique dynamique qui pourrait permettre des exportations supplémentaires et donc de l'activité et de l'emploi (notamment industrielles via un prix compétitif de l'électricité française). Ceci n'a pas été retenu en termes d'exportations accrues d'électricité (néanmoins, le marché existera certainement). Les exportations de technologie éolienne, solaire et nucléaire seraient potentiellement importantes dans ce scénario, une fois de plus s'il existe des filières à dominante nationale. Le transport avec véhicules électriques ou hybrides rechargeables est aussi technologiquement très avancé. Le stockage, centralisé ou réparti, en technologie de rupture, serait aussi largement développé et exporté. A plus long terme, le développement des technologies de l'hydrogène est aussi inclus dans ce scénario. En revanche les équipements de certaines technologies auxquelles il est largement fait appel ne sont pour l'instant pas produits en France, c'est le cas notamment des pompes à chaleur ou des chauffe-eau thermodynamiques pour le secteur du bâtiment.

Le scénario **DIV** pourrait permettre de développer les capacités d'ingénierie technique et organisationnelle pour la conception, la mise en place et la gestion des systèmes énergétiques intelligents multi-vecteurs. Par ailleurs le développement des réseaux énergétiques locaux pourrait avoir un impact positif sur tous les fournisseurs d'équipements (des tuyaux aux dispositifs de régulation complexes en passant par les pompes à chaleur haute performance). De même, le potentiel d'activité et d'emploi dans le domaine de la biomasse (dont les biocarburants de seconde génération) et des véhicules à moteur thermique basse consommation (véhicule 2 l/100km) et hybrides rechargeables est ici très important.

L'ensemble des chiffrages qui suivent sont faits avec les niveaux d'emploi de 2012.

a) *Secteur du résidentiel-tertiaire*

L'impact sur l'emploi des scénarios de l'ANCRE a été chiffré, pour le secteur du bâtiment à partir du tableau économique d'ensemble de l'INSEE. Les emplois directs sont calculés à partir du contenu en emploi de la branche « Travaux de construction spécialisés ». Les emplois indirects sont calculés à partir du contenu en emploi de la branche N et de la consommation intermédiaire de cette branche N dans la branche Construction.

Seuls les travaux de rénovation thermique sont pris en compte, les constructions neuves ne sont pas considérées car les écarts entre scénarios sont considérés faibles.

### Évolution des emplois directs et indirects (différentiel entre 2010 et 2050) :

Milliers d'emplois	Emplois directs	Emplois indirects	Emploi total
TEND	36	36	72
SOB	201	204	405
ELE	104	105	209
DIV	105	106	211
ELEC-V	104	105	209

Ces chiffres représentent les emplois induits par les différents scénarios de rénovation énergétique. S'ils intègrent bien les emplois induits dans la branche « Travaux de construction spécialisés » et dans les branches intermédiaires, **ils ne constituent pas un calcul de gain d'emploi net pour l'économie française**, les sommes investies par les ménages pour la rénovation pouvant pour partie provenir d'une réallocation de sommes d'ores et déjà dépensées dans ces secteurs ou dans d'autres. Pour un calcul de gain net pour l'économie française, la prise en compte de cet effet « d'éviction » viendrait diminuer sensiblement ces chiffres. Toutefois, le secteur du bâtiment étant plus intensif en emploi que la moyenne de l'économie française, le gain net est vraisemblablement positif.

#### *b) Secteur des transports*

Pour le secteur Transport, les données le permettant, le choix d'une approche structurelle a été faite. Pour le transport routier les données synthétiques d'emplois par branche du rapport annuel du CCFA (Comité des constructeurs français de l'automobile) ainsi que les données de l'INSEE pour les transports ferroviaires et aériens ont été exploitées. Aujourd'hui, les emplois directs\* et indirects\*\* du secteur routiers sont estimés à 2,5 millions, un chiffre en baisse sur la période 2000-2010. Les emplois dans le secteur ferroviaire représentent 240 000 emplois et l'aérien 60 000. Le poids du secteur routier est majeur et justifie une analyse désagrégée.

\* *Industrie manufacturière : construction véhicules, services, accessoires, carrosserie, remorques, caravanes.*

\*\* *Professionnels de l'automobile, assurances, experts, crédit, ventes de carburants, auto-écoles, sport, presse-édition, transport routier marchandises et voyageurs, administration, construction entretien des routes.*



## Évolution des emplois directs et indirects (différentiel entre 2010 et 2050, en milliers d'emplois) :

### Transport routier

	Emplois directs	Emplois indirects	Emploi total
TEND	102	308	410
SOB	-264	-123	-387
ELE	29	303	332
DIV	14	304	319
ELEC-V	29	303	332

### Ferroviaire

	Emploi total
TEND	42
SOB	211
ELE	42
DIV	42
ELEC-V	42

### Aérien

	Emploi total
TEND	39
SOB	39
ELE	45
DIV	45
ELEC-V	45

Les chiffres représentent les variations d'emplois liés aux scénarios à l'horizon 2050 par rapport à 2010 sur le périmètre des transports routiers, ils ne constituent pas un calcul de gain (ou de perte) d'emplois net pour l'économie française. Le scénario **SOB** conduit à une diminution relativement importante des emplois directs qui s'explique par la forte baisse des nouvelles immatriculations associée à une diminution du parc de véhicule (celui-ci est divisé par deux à l'horizon 2050). Les emplois créés dans les transports en commun, malgré une forte hausse, notamment sur le secteur ferroviaire, ne compensent pas cette perte. Dans les scénarios **DIV** et **ELE**, la croissance des immatriculations liée à la croissance de la population, mais aussi et surtout au renouvellement plus



rapide du parc pour accélérer la pénétration et la diffusion des nouvelles technologies véhicules, plus efficaces et moins consommatrice de produits pétroliers, tire l'ensemble des emplois du secteur.

### *Raffinage*

	Emploi total
TEND	-17
SOB	-42
ELE	-44
DIV	-41
ELEC-V	-44

Si l'on considère la production de carburants, dans tous les scénarios, la diminution de l'appel aux hydrocarbures fossiles se traduit par une perte nette d'emplois (même dans le scénario de référence), au profit partiellement de la filière de transformation (hors culture et collecte) de la biomasse en biocarburants liquides ou gazeux. Comme on pouvait l'anticiper, la forte progression des biocarburants dans le scénario **DIV** se reflète dans le niveau d'emploi du scénario.

### *Production de biocarburants*

	Emploi total
TEND	10,5
SOB	10,5
ELE	11
DIV	28
ELEC-V	11

### *c) Secteur de la production d'électricité*

Les emplois dans la production d'électricité ont été chiffrés à partir des données issues du rapport « Energies 2050 », de l'étude de P.Quirion sur « l'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France », et de l'étude faite par InNumeri pour le compte de l'ADEME. Ils sont donc calculés à partir des données observées aujourd'hui, leur extrapolation à 2050 n'ayant pu être réalisée dans les délais impartis.

Les emplois ont été chiffrés à la construction et à l'exploitation pour les principaux moyens de production.



## Données d'emploi à la construction

Moyen de production	ETP/M€
Nucléaire	1,41
Fioul	0,35
Gaz	0,35
Charbon	0,35
Hydraulique	5,2
Energies marines	NC
Bois	NC
Déchets urbains	4,1
Biogaz	NC
Géothermie	6
Résidus agricoles	NC
Eolien Terrestre	3,1
Eolien Maritime	NC
Solaire thermodynamique	NC
Photovoltaïque	6
Thermique décentralisé non EnR	NC

NC=Non chiffré

## Données d'emploi à l'exploitation

Moyen de production	ETP/MW
Nucléaire	1,25
Fioul	1,2
Gaz	1,2
Charbon	1,2
Hydraulique	0,33
Energies marines	NC
Bois	NC
Déchets urbains	NC
Biogaz	NC
Géothermie	NC
Résidus agricoles	NC
Eolien Terrestre	0,26
Eolien Maritime	0,26
Solaire thermodynamique	NC
Photovoltaïque	0,43
Thermique décentralisé non EnR	NC

NC=non chiffré

A partir de ces données et de l'évolution des parcs installés, il est possible de calcul l'impact des différents scénarios sur l'emploi moyen dans le secteur de la production d'énergie.



## Emplois à la construction

	Milliers d'emplois
TEND	29,5
SOB	25,3
ELE	35,2
DIV	25,7
ELEC-V	26,6

## Emplois à l'exploitation

	Milliers d'emplois
TEND	133,8
SOB	131
ELE	136
DIV	144,7
ELEC-V	138,9

A nouveau, ces chiffres ne sont pas des gains nets en emploi mais uniquement des emplois concernés par les différents scénarios de l'ANCRE, à partir de données d'intensités en emplois observées aujourd'hui.

### **4.1.5. Bilan économique pour les finances publiques**

#### *a) Secteur du résidentiel-tertiaire*

Une partie de la dépense des ménages pour l'amélioration de l'habitat est subventionnée par des aides publiques sous différentes formes. En 2010, les aides publiques de l'Etat se répartissent en 2 Mds€ de crédit d'impôt, 1,3 Md d'éco-prêt à taux zéro et 0,4 Md d'éco-prêt logement social. Ces aides sont de différentes natures, le CIDD (Crédit d'impôt développement durable) est une subvention directe différée de 18 mois. Il a entraîné des dépenses totales de l'ordre de 8 Mds€ (taux de subvention de l'ordre de 25%). Les prêts représentent le montant total des travaux, la subvention publique est également de l'ordre de 25%, correspondant à la différence entre un taux de crédit commercial et un taux zéro.

De façon très schématique, et au regard des éléments indiqués dans la partie Investissements, pour réaliser les scénarios **ELE** et **DIV**, il faudrait multiplier par trois le montant des investissements



consacrés à l'efficacité énergétique (et vraisemblablement faire de même pour l'aide publique) ; pour le scénario **SOB**, il faudrait quasiment multiplier par cinq ou six ces investissements.

## *b) Secteur des transports*

La taxation des carburants représentait en 2010 un revenu pour l'état d'environ 35 milliards d'euros (dont environ 30% de TVA et 70% de TIC). En considérant une évolution de cette taxe identique à l'évolution de la consommation d'énergie finale dans les transports, ces revenus seraient réduits de 40% à 55% selon les scénarios à l'horizon 2050, soit une baisse de revenus de 15 à 20 milliards d'euros. Evidemment l'analyse de l'impact sur les recettes fiscales de l'Etat devrait dans tous les secteurs prendre en compte les conséquences de l'introduction d'un prix du carbone.

Un premier chiffrage (sans prise en compte de possibles exonérations) sur la base des émissions de CO<sub>2</sub> énergétique pour chaque scénario et du niveau de taxe carbone (de l'ordre de 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030 et 240€/tCO<sub>2</sub> en 2050) montre que celle-ci rapporterait un montant légèrement supérieur à 20 milliards d'euros en 2030 et 2050, compensant les pertes de recettes fiscales de l'Etat sur le TIC et la TVA des produits fossiles.

## 4.2. Les critères d'ordres environnementaux et sociétaux

### 4.2.1. Biodiversité et impact environnementaux

Les trois scénarios se caractérisent par un impact environnemental favorable dans la mesure où ils conduisent à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et des polluants liés à la combustion d'hydrocarbures dans les transports. Pour autant, pour ce qui concerne l'impact sur le climat, un effort français ne peut avoir de portée que s'il s'accompagne d'une mobilisation internationale (la France représentait en 2010 1,2 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> énergétique).

En outre, il sera nécessaire de prendre en considération le risque de "fuites de carbone", c'est à dire de délocalisation des activités les plus émettrices de CO<sub>2</sub> qui pourrait résulter, par exemple d'une baisse de la compétitivité-prix de l'énergie en France favorisant une délocalisation d'activités industrielles. Dans l'hypothèse d'une exploitation des ressources nationales d'hydrocarbures de roche-mère, des développements technologiques en rupture seraient nécessaires pour limiter au maximum les impacts environnementaux de cette production.

L'usage des sols et l'emprise des énergies renouvelables ont un impact sur ce critère qu'il faudrait mieux évaluer. Les estimations en km<sup>2</sup> ont été réalisées sur des hypothèses en surfaces réelles prenant en compte des gains d'efficacité à l'unité de surface, mais également des tailles d'unités de production non répandues actuellement (grandes fermes éoliennes, forte pénétration de cultures dédiées à croissance rapide, ...). De plus, ces évaluations sont définies vecteur par vecteur, Or, l'aménagement des territoires qui est sous-jacent à l'introduction de ces activités, sera plus complexe, demandera de les combiner et de les optimiser. On peut également penser que leurs impacts interagissent et que c'est par une approche globale qu'il sera possible d'améliorer l'évaluation.

L'analyse par scénarios permet d'identifier les impacts relatifs suivants :

- **SOB** : Les (très bonnes) performances de ce scénario en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> sont dépendantes – à hauteur de 40 MtCO<sub>2</sub> – de la réalisation du captage et stockage de CO<sub>2</sub>, qui



constitue une des ruptures technologiques importantes des scénarios de l'ANCRE, et dont on mesure mal aujourd'hui les conditions de développement aux plans économique, technique et sociétal.

- **ELE** : Ce scénario est proche du précédent, avec plus de d'EnR et du stockage massif.
- **DIV** : ce scénario suppose près de 5 Mha de cultures mobilisables pour l'énergie (soit près de 10% du territoire ou encore plus de 15% de la surface agricole utile), car il ne suppose pas de recours accru aux importations. Dans ces cultures, 2,2 Mha sont alloués à des cultures à croissance rapide, ce qui représente 12% des surfaces des terres arables, certaines productions (les taillis à courte rotation) pouvant toutefois être introduites en forêt (cf. annexe 2). Des mesures devront être prises pour éviter que cette mobilisation n'altère la biodiversité et que les ressources soient gérées de façon à assurer leur pérennité. Une vigilance devra également être portée aux les émissions de polluants locaux liés à l'utilisation de la biomasse (émissions de particules).

#### 4.2.2. Changement climatique

Le changement climatique aura à la fin un impact positif en venant réduire le besoin en chauffage, et un impact négatif sur le potentiel agricole et la consommation de climatisation.

Pour approcher le Facteur 4 tous GES (et atteindre le Facteur 4 CO<sub>2</sub>) en 2050, tous les leviers sont utilisés, à divers degrés en fonction des scénarios : évolutions des comportements, substitutions entre énergies, amélioration de l'efficacité énergétique, pénétration des innovations technologiques.

Pour autant, le Facteur 4 ne peut être atteint sans des ruptures technologiques majeures (selon les scénarios : capture et stockage de carbone, stockage massif d'énergie ou développement de réseaux pour distribuer la chaleur nucléaire cogénérée, etc...). L'objectif de 2020 fixé dans le cadre européen correspondant à une réduction des émissions de 17% par rapport à 1990 est respecté.

#### 4.2.3. Impacts santé, accidents, risques et sûreté

L'ANCRE n'a pas actuellement travaillé sur ce critère. Toutefois deux points peuvent être soulignés :

- Même si leur intensité varie, les risques sont de même nature entre les scénarios puisque les technologies employées sont les mêmes, y compris les risques d'accidents liés à la production d'électricité.
- Tous les scénarios supposent une augmentation des productions intermittentes d'énergies, ce qui devra être examiné sous l'angle de la sécurité et de la robustesse des réseaux en cas de situation de délestage ou de blackout.

Par ailleurs, des travaux importants devront être menés sur la connaissance et l'évaluation de ces risques, ainsi que sur la communication et l'information des publics. La mise en place des cadres réglementaires adéquats est aussi un sujet qui devra être précisé.



## 4.3. Les critères d'ordres politiques et stratégiques

### 4.3.1. Robustesse et résilience du système

Cet aspect n'a pas été abordé spécifiquement par l'ANCRE. Les scénarios choisis sont tous typés et correspondent à des options volontaristes, de sorte que les risques associés (notamment en termes de non atteinte des objectifs) ne sont pas négligeables. Toutefois, les tendances majeures de diminution de l'exposition à des chocs sur les marchés énergétiques internationaux sont très favorables. A noter aussi que la diversification est un facteur positif de résistance aux chocs externes.

Un des objectifs de l'ANCRE est de préciser les conditions de réalisation des scénarios (outre la R&D : politiques économiques, réglementation, organisation, gouvernance, stratégie des filières...). Les trois scénarios supposent une augmentation importante du prix de l'énergie avec des conséquences à maîtriser pour limiter la précarité énergétique et préserver la cohésion sociale. Le recours massif aux énergies renouvelables et la problématique du développement de réseaux appellent une prise en compte de situations très variées (liées notamment aux potentiels locaux d'utilisation des EnR). Enfin, ces trois scénarios reposent sur des besoins d'investissements massifs (infrastructures de réseau, équipements moins énergivores...) impliquant une réflexion sur les modèles économiques permettant de susciter l'adhésion des financeurs sans avoir d'effets d'aubaine.

Les impacts par scénario peuvent être analysés de la manière suivante :

- **SOB** : ce scénario, qui table sur des évolutions majeures en matière de mobilité, exige une prise en considération des besoins de mobilité de l'ensemble des catégories sociales afin d'y faire face en préservant les populations les plus vulnérables. De même, la forte diminution des consommations de chaleur dans le bâtiment, l'absence d'effets rebonds, la baisse des consommations d'électricité etc., supposent des évolutions assez significatives des comportements de consommation. Les efforts nécessaires pour permettre une réduction de la demande dans le résidentiel-tertiaire exigent une réflexion sur les modalités de financement des investissements requis. Plus largement l'introduction d'un signal-prix élevé par le biais d'une taxation du carbone suppose que soient examinée avec attention la question de la redistribution ou de la compensation pour les ménages exposés.
- **ELE** : le scénario suppose la construction de près de 200 GWe de capacité de production électrique par les EnR d'ici 2050. La répartition de ces constructions sur le territoire national devrait permettre d'exploiter au mieux les gisements, tout en évitant d'éventuels conflits d'usage des sols. Le rythme prévu de déploiement des véhicules électriques et hydrogène suppose un dispositif facilitant leur pénétration.
- **DIV** : dans ce scénario, le recours massif à la biomasse suppose de gérer les éventuels conflits d'usage. Les approches collaboratives sous-jacentes aux projets de territoire sont au cœur du scénario qui reflète cette ambition. Il s'agit non pas d'avoir des approches opportunistes, mais d'engager les territoires dans des voies de développement concertées à visée productive (multi-biomasses et multi-usages, infrastructure de transport de la chaleur issue de cogénération nucléaire, etc.). Ceci demande de lever des difficultés internes de structuration des filières (agriculture, forêt, déchets), mais également de trouver des solutions communes à ces secteurs d'activités. La mise en place d'un réseau de plateformes biomasses est un exemple possible de cette mutualisation. Le besoin en infrastructure en termes de réseau de chaleur et le recours à la cogénération nucléaire posent également des questions importantes d'acceptabilité sociale.



## 4.3.2. Matériaux stratégiques et gestion des ressources naturelles

L'UE ne produit que 4% de la production mondiale de métaux (cas du zinc). Elle est donc à 100% dépendante de l'importation de la plupart des métaux impliqués dans les énergies renouvelables. La France métropolitaine est dans une situation de dépendance encore plus importante, puisqu'elle n'a pas d'activité de production primaire de métaux sur son territoire. Or la consommation mondiale de métaux a explosé depuis le début des années 2000 avec un taux d'accroissement de 5%/an en moyenne pour les métaux de base, et bien supérieure pour les métaux rares : les taux moyens de croissance peuvent dépasser 10% pour certaines matières premières minérales, par exemple le néodyme utilisé dans les aimants permanents Nd-Fe-B.

Ce contexte extrêmement tendu de disponibilité des ressources minérales et métalliques, peut constituer un frein au développement de la transition énergétique, même si elle est technologiquement, économiquement et socialement envisageable. En Europe, la Commission Européenne a inscrit la problématique des matières premières non énergétique à son agenda à travers l'Initiative Matières Premières [COM (2008) 699], dont la mise en œuvre a fait l'objet d'un rapport d'avancement au Conseil et au Parlement Européen en juin 2013 [COM (2013) 442]. Les matières premières minérales non-énergétiques sont l'une des priorités du prochain programme cadre de recherche et d'innovation « Horizon 2020 », elles sont également l'objet d'un Partenariat Européen pour l'Innovation. En France, le comité pour les métaux stratégiques (COMES), créé en 2011 par le ministère chargé de l'industrie réunit les acteurs concernés par la problématique des métaux stratégiques : Etat, organismes de recherche directement concernés (Ademe, BRGM, CEA, IFREMER) et industriels.

Pour augmenter l'efficacité et les rendements des technologies et des installations, l'appel aux minerais (Fe, Al, Cu) et éléments rares (gallium, indium, selenium, tellurium, dysprosium, neodymium, praeosodymium et terbium) va augmenter fortement. A titre d'illustration, pour une même puissance installée les éoliennes et les technologies solaires consomment jusqu'à 90 fois plus d'aluminium, 50 fois plus de fer, de cuivre et de verre et 15 fois plus de béton que les centrales thermiques plus classiques (fioul, gaz naturel ou nucléaires).

En matière d'impact, ce point reste à approfondir. L'ANCRE n'a en effet pas été pour l'heure en mesure de chiffrer l'impact de ses scénarios sur la demande en ressources stratégiques autres que les ressources énergétiques.

Par ailleurs, la mobilisation accrue de biomasse domestique pose des questions relatives à l'impact des cultures dédiées réputées intensives en intrants (dont eau), à la biodiversité, à l'usage et à la qualité des sols avec le prélèvement des pailles et des rémanents forestiers... Ainsi, dans les scénarios ANCRE, les quantités de biomasses évaluées se fondent sur des critères agronomiques et de gestion forestière raisonnée (schémas sylvicoles prenant en compte les critères d'exploitabilité et de durabilité<sup>8</sup> ; pas de décapitalisation nette).

La valorisation des déchets (dans le sens produits en fin de vie) est une constante des scénarios ANCRE. L'amélioration des taux de collecte et de tri est pris en compte également ce qui accroît la recyclabilité. Les évaluations faites sont grossières (maille nationale), alors que les impacts d'une mobilisation accrue sont liés aux conditions locales (à la parcelle). Un autre élément peu ou pas suffisamment pris en compte est celui du changement climatique. Les stratégies d'adaptation (sans

---

<sup>8</sup> Selon la richesse des sols estimée avec les relevés de l'IGN -observation pédologiques et floristiques- on peut distinguer les cas où la récolte des menus bois pourra être réalisée sans contrainte, seulement une ou deux fois dans la vie du peuplement voire même pas du tout.



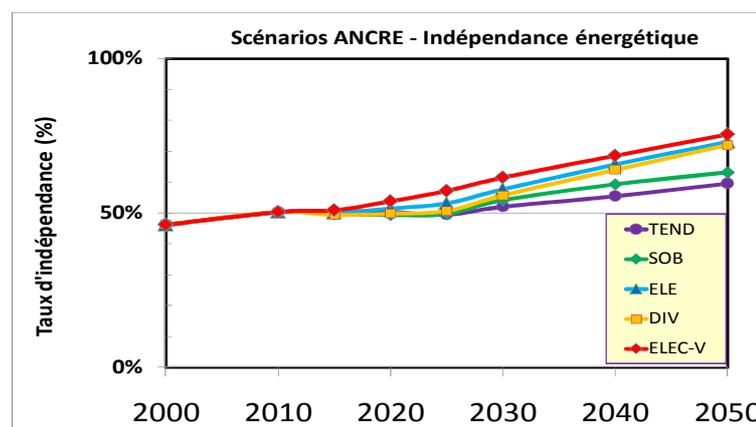
compter les choix liés à la mitigation) mériteraient d'être plus particulièrement étudiées afin d'établir de façon plus fine les choix de gestion par scénario.

Pour cette problématique, on note les impacts suivants :

- **SOB** : dans ce scénario, il n'y a pas de changement des pratiques actuelles et pas de cultures dédiées ; on retrouve un mix d'effets positifs souvent associés à la forêt (séquestration carbone, maintien des sols, eau) et d'effets négatifs plutôt associés à l'agriculture (nitrates, eau, pesticides et biodiversité) ou à l'artificialisation des sols (emprise urbaine).
- **ELE** : la question de la qualité des sols agricoles mériterait une attention plus particulière (évaluation en fonction des types de sols et non pas une approche générique donnant un tonnage moyen par hectare) puisque c'est dans ce scénario qu'il y a le taux d'exportation de paille le plus fort.
- **DIV** : ce scénario est celui qui pousse le plus loin l'usage de la biomasse pour les forêts et pour les cultures dédiées. Les modifications d'usage des sols, notamment l'introduction de cultures dédiées sur sols forestiers (en remplacement de « mauvais taillis »), méritent un examen poussé en termes d'impacts. Enfin, l'approche territoriale permet d'envisager des synergies nouvelles d'activités accroissant la recyclabilité.

#### 4.3.3. Indépendance énergétique et sécurité d'approvisionnement

Les trois scénarios conduisent à une baisse de la dépendance énergétique, sous l'effet de la diminution de la consommation d'énergie (primaire et finale), et plus particulièrement de celle des énergies fossiles. L'indépendance énergétique d'un pays est un indicateur de la politique énergétique permettant d'évaluer la sécurité d'approvisionnement sur le long terme. Il convient donc de la renforcer d'autant qu'une moindre dépendance vis-à-vis des pays exportateurs de pétrole et de gaz va de pair avec une réduction du déficit de la balance commerciale. L'indépendance énergétique est principalement renforcée par la réduction des importations d'énergies fossiles, ainsi que par le recours au nucléaire et aux énergies renouvelables. L'objectif d'un taux d'indépendance supérieur à 70% peut être atteint en 2050.



- **SOB** : sur le plan de la dépendance énergétique, ce scénario apparaît comme le moins vertueux après le tendanciel, avec une baisse plus lente du taux de dépendance qui aboutit en 2050 à 33% (versus 51% en 2010). Les faibles consommations de ce scénario, dans le



secteur des transports essentiellement, ne sont que peu substituées par des sources moins carbonées d'origine nationale.

- **ELE** : le taux de dépendance est de 29% en 2050. La différence essentielle avec le scénario précédent (laquelle reste modeste) porte sur un recours plus fort au nucléaire en fin de période et à une plus forte pénétration de l'électricité (peu carbonée et surtout plus efficace) dans l'ensemble des secteurs.
- **DIV** : Parmi les trois scénarios, il s'agit du plus efficace sur ce critère, avec un taux de dépendance énergétique en 2050 évalué à 23%, dû à une baisse plus marquée de la consommation de pétrole et de gaz, grâce à un recours plus important à la biomasse domestique notamment.

#### 4.4. Bilan de l'évaluation multicritère

L'ANCRE a regroupé les enseignements des analyses précédentes dans un tableau, en écart par rapport au scénario tendanciel, selon deux périodes (2010-2030 et 2030-2050). Cet exercice montre l'état de l'art actuel du groupe de travail, en lien avec des très nombreuses interfaces externes. On constate que les travaux devront se poursuivre, tant sur le plan des données que des méthodes. Nous avons notamment souhaité mettre en évidence des lignes non évaluées, pour insister sur l'état de l'art de notre exercice, à la fin 2013.

L'analyse multicritère ici menée n'a pas permis de décider quel est le « meilleur scénario », ce qui n'est pas le but de l'exercice, mais n'apparaît de toutes façons pas possible ni pertinent, tant les pondérations entre les critères peuvent varier selon les individus ou organisations concernées... si même il était possible de tenter l'exercice d'une aggrégation des critères (des travaux de méthodes sont d'ailleurs hautement souhaitables dans cette voie).

Elle montre des critères évalués « négativement » pour la majorité des scénarios dès lors que ceux-ci portent sur les coûts ou les efforts à fournir, surtout dans la première période. C'est le « prix à payer » pour atteindre, en deuxième période les objectifs fixés, en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>. Toutefois, d'autres bénéfices sont issus de scénarios à finalité largement climatique et énergétique : balance commerciale, indépendance énergétique, création de champions nationaux dans des filières de haute technologie notamment.

#### Indicateurs de modes de vie

Avant de passer en revue la synthèse des évaluations multicritères, il convient de rappeler que les différents scénarios sont fondés sur des « visions » différentes et contrastées des futurs possibles. C'est ce que décrit le tableau ci-après portant sur des indicateurs descriptifs du mode de vie.



	2010	2030	2050	Taux annuel moyen d'accroissement 1990-2010	Taux annuel moyen d'accroissement 2010-2050
<b>Population (Millions d'habitants)</b>	<b>62,8</b>	<b>68,5</b>	<b>72,3</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,4%</b>
<b>Scénario TEND</b>					
<b>Habitat</b>					
Mm <sup>2</sup>	2 539	3 063	3 559	1,3%	0,8%
m2/hab	40	45	49	0,7%	0,5%
Part de l'habitat collectif (% logements)	43%	44%	45%	-0,2%	0,1%
<b>Tertiaire</b>					
m2/emploi	52	55	55	0,4%	0,2%
<b>Mobilité</b>					
Traffic passager (hors aérien) Gpkm	971	1 088	1 219	1,4%	0,6%
Parc de véhicules particuliers (Millions de véhicules)	31	37	43	1,5%	0,85%
<b>Scénarios ELE (ELEC-V) et DIV</b>					
<b>Habitat</b>					
Mm <sup>2</sup>	2 539	3 063	3 559	1,3%	0,8%
m2/hab	40	45	49	0,7%	0,5%
Part de l'habitat collectif (% logements)	43%	44%	45%	-0,2%	0,1%
<b>Tertiaire</b>					
m2/emploi	52	55	55	0,4%	0,2%
<b>Mobilité</b>					
Traffic passager (hors aérien) Gpkm	971	1 088	1 219	1,4%	0,6%
Parc de véhicules particuliers (Millions de véhicules)	31	36	39	1,5%	0,6%
<b>Scénario SOB</b>					
<b>Habitat</b>					
Mm <sup>2</sup>	2 539	2 957	3 377	1,3%	0,7%
m2/hab	40	43	47	0,7%	0,4%
Part de l'habitat collectif (% logements)	43%	46%	49%	-0,2%	0,3%
<b>Tertiaire</b>					
m2/emploi	52	52	52	0,4%	0,0%
<b>Mobilité</b>					
Traffic passager (hors aérien) Gpkm	971	980	976	1,4%	0,0%
Parc de véhicules particuliers (Millions de véhicules)	31	32	17	1,5%	-1,5%

En rouge : valeurs modifiées par rapport au scénario TEND.



## Synthèse des résultats multicritères

Les tableaux ci-dessous offrent une telle synthèse, en écart par rapport au scénario TEND et organisés par familles de critères.

Critère	Période 2010-2030					Période 2030-2050				
	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND
<b>Coût et prix de l'énergie (augmentation comptée négatif)</b>										
Coût de l'énergie TTC*	--	-	-	-	0	--	--	--	--	0
Coût de production de l'électricité	(En cours)	(En cours)	(En cours)	(En cours)	0	(En cours)	(En cours)	(En cours)	(En cours)	0
Facture énergétique du pays (imports)	+	0	+	+	0	+++	+++	+++	+++	0
Dépenses énergétique des ménages	+	0	+	+	0	++	++	++	++	0
<b>Investissements nécessaires (augmentation comptée négatif)</b>										
Investissements énergie	-	---	---	---	0	+	-	+	++	0
Investissements résidentiel tertiaire**	-----	-----	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	0
Investissements transport***	++	-	0	-	0	+++	--	0	--	0
Investissements industrie	na	na	na	na	0	na	na	na	na	0
<b>Emploi</b>										
Emploi énergie	na	na	na	na	0	0	0	0	0	0
Emploi résidentiel tertiaire	++++	++++	++++	++++	0	++++	++++	++++	++++	0
Emploi transport	(En cours)	(En cours)	(En cours)	(En cours)	0	-----	-	-	-	0
Emploi industrie	na	na	na	na	0	na	na	na	na	0
Impact total (yc induit) sur l'emploi	(En cours)	(En cours)	(En cours)	(En cours)	0	(En cours)	(En cours)	(En cours)	(En cours)	0
<b>Finances publiques</b>										
Effort en matière de financement public	Fort	Moyen	Moyen	Moyen	0	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	0

Critère	Période 2010-2030					Période 2030-2050				
	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND
<b>Environnement et société</b>										
Emission de GES	+	+	+	+	0	+++	+++	+++	+++	0
Mobilisation de la biomasse	Faible	Faible	Moyen	Faible	0	Faible	Faible	Fort	Faible	0
Usage des sols****	Faible	Faible	Faible	Faible	0	Faible	Faible (1)	Moyen	Moyen	0
Environnement local et santé	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0
Evaluation qualitative de l'impact sûreté-sécurité	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0

Critère	Période 2010-2030					Période 2030-2050				
	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND
<b>Robustesse et résilience du système</b>										
Taux d'indépendance énergétique	0	0	0	+	0	0	++	++	+++	0
Sécurité de l'approvisionnement*****	Faible	Fort	Moyenne	Fort	0	Faible	Moyenne	Fort	Fort	0
Diversification des ressources énergétiques	Faible	Moyenne	Fort	Faible	0	Faible	Moyenne	Fort	Faible	0
Dépendances ressources et matériaux stratégiques	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0	(En projet)	(En projet)	(En projet)	(En projet)	0

Critère	Période 2010-2030					Période 2030-2050				
	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND	SOB	ELE	DIV	ELEC-V	TEND
<b>Technologies développées</b>										
Effort accru nécessaire de R&D (France/Europe)	Fort	Fort	Fort	Moyen	0	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	0
Technologies en rupture nécessaires	Faible	Moyen	Moyen	Faible	0	Moyen	Fort	Fort	Moyen	0
Création de filières nationales de high tech	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	0	Moyen	Fort	Fort	Fort	0

\* Le calcul du coût de l'énergie TTC a été effectué en prenant en compte que l'impact de l'incertitude sur le coût de production de l'électricité n'était pas discriminant entre les différents scénarios.

\*\* Seuls les investissements pour la rénovation énergétique des bâtiments sont pris en compte dans la comparaison des écarts entre scénarios ; les autres investissements d'entretien-amélioration et dans le neuf ne sont pas intégrés dans cette évaluation car supposés peu différentes d'un scénario à l'autre.

\*\*\* Sont prises en compte : les dépenses d'investissements dans les infrastructures routières, y compris équipements et bornes de recharge pour le développement des véhicules électriques, et ferroviaires, dans les installations de production de nouveaux carburants (biocarburants liquides ou gazeux,



hydrogène), enfin les dépenses liées à l'achat de véhicules ferroviaires, mais aussi routiers (VP, VUL, PL et bus).

\*\*\*\*Le critère devrait insérer tous les usages des sols et notamment évaluer l'artificialisation des sols avec les nouveaux systèmes d'aménagement induits par les trajectoires (mobilité, habitat, industrie...). Le travail ici réalisé ne porte sur que les surfaces nécessaires à la production de l'éolien, du photovoltaïque et de la biomasse pour l'énergie. (1) = Faible en % surface nationale, mais non négligeable en terme d'emprise sur certaines zones pour l'éolien et le solaire

\*\*\*\*\* L'ensemble des scénarios dénote une amélioration de ce critère par rapport au scénario de référence, les items "Faible" "Moyen" et "Fort" indiquent le degré d'amélioration.

## Analyse du scénario SOB

Même si très volontariste, comme l'ensemble des scénarios développés par l'ANCRE, sur le plan des évolutions scientifiques et technologique au service de la transition énergétique, le scénario SOB met en avant l'impact de l'évolution des comportements et des modes de vie sur celle de la consommation énergétique.

Sans être un scénario de décroissance, il suppose un certain nombre d'inflexions (voir tableau ci-dessus), par exemple pour ce qui est de la surface de logements dans le résidentiel. Ainsi, si les surface par habitant continuent à croître, de 40m<sup>2</sup> aujourd'hui à 47m<sup>2</sup> en 2050, elles le font à un niveau moindre que dans le scénario tendanciel. La part des logements collectifs augmente de 43% aujourd'hui à 49% en 2050 (à rebours de la tendance observée), limitant ainsi l'artificialisation des sols et les consommations induites en mobilité.

Concernant la mobilité justement, celle-ci décroît avec notamment la mise en place d'un certain nombre d'innovations organisationnelles : accroissement du travail à domicile ou dans un télécentre pour réduire la mobilité pendulaire, incitations au décalage des horaires de certaines entreprises pour limiter la congestion, meilleure gestion de la problématique du retour à vide dans le transport de marchandises, développement de l'autopartage etc. Conséquence de ces transformations, le parc de véhicules (VP et VUL) diminue de moitié à l'horizon 2050.

De la même manière, la production industrielle croît moins vite que dans les autres scénarios, celle-ci étant ralentie par la montée en puissance d'une industrie du recyclage.

Dans ce scénario l'effort, par rapport au scénario tendanciel, en terme d'investissement se concentre dans le secteur résidentiel-tertiaire. Le rythme d'investissement annuel moyen pour la rénovation énergétique est 5 à 6 fois supérieur à celui du scénario tendanciel, ce qui pose de manière plus aigüe la question des mécanismes de financement de cette effort de rénovation.

Dans le transport, l'investissement global est inférieur à celui des autres scénarios, mais la part des dépenses plus spécifiquement prises en charge par la collectivité (développement accéléré des transports en commun routiers ou ferroviaires) double sur la période par rapport au scénario TEND.

Les impacts sur l'emploi sont en cohérence avec ces évolutions : très négatif sur le secteur transport dans sa totalité (emplois directs et indirects), malgré le développement des transports en commun et des flottes « servicielles », très positif sur le secteur du bâtiment.

Sur le plan énergétique global, la diversification des ressources énergétiques reste faible et la trajectoire présente un taux d'indépendance énergétique inférieur à DIV et ELE.



## **Analyse du scénario ELE**

Le scénario ELE suppose essentiellement de mettre en œuvre une politique volontariste de transition en tirant bénéfice de substitutions accrues de l'électricité (très décarbonée) à des vecteurs plus fortement émetteurs de GES.

L'impact est donc important sur le système électrique, notamment en termes d'investissements, une part fortement croissante (jusqu'à près de 50%) étant réalisée à base d'EnR, sur toute la période. Les coûts unitaires de l'électricité (au GWh) augmentent avec la mise en œuvre rapide des EnR, mais les coûts de ces moyens de production sont appelés à fortement baisser à moyen long terme. Les coûts pour gérer l'intermittence sont croissants, même en présence de nouvelles technologies de stockage. Les usages de l'énergie s'adaptent à la stratégie d'ensemble, par exemple via le développement de l'hydrogène et de la mobilité électrique, ce qui se traduit par d'important investissements dans le domaine transport. Les comportements sont toutefois supposés évoluer moins fortement que dans SOB, par exemple. Le financement public est mobilisé dans de nombreuses directions, à un niveau jugé au total comparable à l'ensemble des autres scénarios.

Les impacts en termes d'emplois sont d'autant plus favorables que les exports accompagnent ce scénario (avec une R&D active).

Bien que la mesure des impacts sociaux des scénarios reste largement en devenir, on peut augurer que ce scénario est un des moins complexes à mettre en œuvre, car la transition peut y apparaître au moins autant promue par des réponses technologiques que par des mesures plus politiques d'évolution de la société. C'est lui toutefois qui suppose le parc nucléaire le plus important. Corrélativement, un des points majeurs est la possibilité de développer des quantités importantes d'EnR électriques.

Ce scénario est particulièrement propice en termes d'approvisionnement en énergie, via la combinaison du nucléaire (contenu en importations très faible) et d'EnR (à condition que la fabrication soit française ou européenne). C'est aussi l'un des plus robustes aux fluctuations géopolitiques ou fluctuations de marchés des commodités énergétiques. Il faut noter toutefois des importations gazières en hausse dans les années 20, que seul le scénario ELEC-V évite.

Les besoins en R&D de ce scénario sont forts, autant en ce qui concerne les moyens de production (nucléaire en génération III puis IV, pour être prêts en 2045-2050, éolien et solaire, énergies marines...), de stockage, que de gestion des réseaux pour impérativement faire chuter les coûts des systèmes électriques lié au développement massif des EnR.

## **Analyse du scénario DIV**

Le scénario DIV décrit un futur du système énergétique français combinant pour le Facteur 4 efficacité accrue, développement des énergies renouvelables et diversification des vecteurs énergétiques décarbonés. Dans cette configuration la contribution de l'électricité aux usages finals est relativement moins importante que dans le scénario ELE et donc les coûts de production plus faibles.

Les investissements de rénovation des bâtiments sont aussi plus faibles que dans SOB et la contribution des biocarburants permet de limiter l'investissement dans les nouvelles infrastructures de transport. L'impact global sur l'investissement et les finances publiques est donc modéré, malgré la nécessité de développer d'autres infrastructures, en particulier en matière de réseaux de chaleur.

Ce scénario, par la diversité des sources mobilisées, permet de limiter et de diversifier les risques associés aux différentes sources d'énergie. En revanche c'est celui qui appelle la plus forte mobilisation des bioénergies (biocarburants, biogaz, biomasse-combustible) et donc présente les



impacts les plus importants sur les usages des sols et la valorisation des forêts. Si les risques d'accident industriels sont plus limités que dans d'autres scénarios, en revanche les impacts en termes d'environnement local et de santé liés à la mobilisation des biomasses devront être maîtrisés.

La diversification constitue en elle-même un atout du point de vue de la robustesse et de la résilience du système. Ce scénario suppose un effort de R&D soutenu, et lui-même assez diversifié pour équilibrer les opportunités de développement des différentes sources et vecteurs. Il suppose également des innovations organisationnelles importantes pour le développement et la gestion des nouveaux réseaux de chaleur et de biogaz, ou encore pour une mobilisation optimisée de la biomasse lignocellulosique.

## **Analyse du scénario ELEC-V**

Le scénario ELEC-V est une variante qui s'affranchit de la contrainte du passage de la part du nucléaire à 50% en 2025 tout en restant aussi volontariste que les autres scénarios sur l'introduction des énergies renouvelables dans le mix. Elle est assez proche du scénario ELE dans les technologies mobilisées, mais le recours à l'électricité y est assez nettement inférieur (la logique est dans ce cadre assez proche du scénario DIV). L'évolution du mix de production électrique conduit à une baisse progressive du nucléaire pour atteindre 60% en 2050. Ce faisant, il n'est nul besoin de recourir temporairement aux centrales à gaz pour pallier l'intermittence. Les émissions de CO<sub>2</sub> s'en trouvent réduites tout au long de la trajectoire considérée et, à l'arrivée, c'est le scénario qui affiche les plus faibles émissions totales de gaz à effet de serre en 2050.

Les investissements en production électrique bénéficient, en première période, de l'absence de besoin de remplacement du parc nucléaire qui serait arrêté dans les autres scénarios. Il s'agit typiquement de montants compris entre 10 et 20 milliards d'euros. Les règles prises pour la différenciation des critères ne permettent pas de mettre en évidence cet écart. En seconde période, c'est un parc nucléaire un peu plus important en proportion qui permet un bon résultat. La demande électrique, plus basse que dans le scénario ELE de l'ordre de près de 200TWh en 2050, demande par ailleurs un investissement total plus faible.

Les aspects « emplois » sont proches du scénario ELE et DIV, de même que les besoins de financement public, sous réserve, en première période, que les coûts ici plus bas de production électrique soient répercutés sur les tarifs.

Les impacts environnementaux et sociétaux sont proches de ceux d'ELE et DIV, avec un usage des sols légèrement décontraint en termes de développement des EnR électriques. Inversement, ce scénario suppose un recours au nucléaire à un niveau élevé (mais toutefois inférieur de 5 GW à celui du scénario ELE en 2050).

Par ailleurs, le scénario ELEC-V présente la plus forte indépendance énergétique et la meilleure performance en termes de déficit de la balance commerciale extérieure grâce à un moindre recours à l'importation de combustibles fossiles (en première période).

Les autres paramètres pris en compte, notamment ce qui concerne la demande, sont proches du scénario DIV.

La R&D nécessaire est comparable à celle du scénario ELE. Elle est toutefois plus faible en première période, le recours à des filières françaises en EnR électriques étant moins central. Ce scénario ne demande pas de ruptures technologiques aussi marquées que les autres en première période tout au moins.



# ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie



## 5. Conséquences pour la recherche

### 5.1 Les scénarios supposent la levée de verrous majeurs

Les scénarios proposés par l'ANCRE reposent sur le recours à des technologies qui, pour certaines, sont à un stade de développement encore éloigné d'une mise sur le marché et, pour d'autres, à l'instar de certaines énergies renouvelables, requièrent des efforts de R&D destinés à accroître leurs performances afin de permettre un déploiement à une échelle suffisante dans des conditions économiques soutenables. Parmi ces défis figurent de véritables ruptures technologiques qui s'imposent pour parvenir à l'objectif du Facteur 4 : capture, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub> dans le scénario **SOB**, stockage massif d'électricité pour **ELE** et cogénération pour **DIV**.

Si pour chaque scénario, des défis majeurs peuvent être identifiés, la R&D qu'ils appellent ne doit pas conduire à ralentir les efforts de R&D sur d'autres avancées technologiques et notamment, ne pas obérer la pérennité des filières actuellement majoritaires et structurantes pour le paysage énergétique français. Néanmoins, des efforts particuliers devront être mis en œuvre pour relever ces défis majeurs dans la mesure où ils prendront une place cruciale dans la transition et qu'il apparaît, dans cette perspective, indispensable de disposer d'une offre nationale en termes de produits et services ; cela afin de faire bénéficier l'économie de l'activité générée et d'éviter de devoir recourir à des importations massives d'équipements. De surcroît, les efforts de R&D devront également viser **la levée de verrous non technologiques**, notamment comportementaux et sociétaux et être soutenus par des politiques et systèmes d'incitation adaptés.

Ces considérations ont guidé l'ANCRE dans l'élaboration d'une contribution, dédiée aux secteurs de l'énergie et du transport et transmise au ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche en juin 2013, en vue de l'élaboration de la Stratégie Nationale de Recherche. Les priorités thématiques de recherche mises en avant sont articulées autour des cinq axes suivants :

#### **Priorité 1 : Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique**

- **Optimiser le système énergétique** : stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs, réseaux intelligents
- **Réduire la consommation énergétique nationale** : efficacité énergétique des usages dans le bâtiment, le secteur des TIC, les transports et l'industrie
- **Développer une offre compétitive en matière d'énergies renouvelables** afin de favoriser leur insertion dans le mix énergétique sans surcoût excessif.

#### **Priorité 2 : Capitaliser sur les atouts compétitifs des filières actuellement majoritaires dans le bouquet énergétique et veiller à la sécurité d'approvisionnement des ressources stratégiques**

- **Evaluer les ressources énergétiques et minérales stratégiques** (hydrocarbures de roche compacte, hydrates de gaz, gaz biogénique et hydrogène naturel) et développer outils et méthodes pour en proposer une exploitation économiquement performante et respectueuse de l'environnement.
- **S'agissant de l'énergie nucléaire** : poursuivre l'amélioration de la sûreté du parc et celle du conditionnement des déchets radioactifs, l'adapter au contexte de la transition énergétique (gestion de l'augmentation d'énergies intermittentes et utilisation de la chaleur fatale).



### **Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique**

- **Développer le captage, transport, stockage et valorisation du CO2 (CSVC)**
- **Récupérer les chaleurs fatales, les stocker, les transporter et les utiliser.**

### **Priorité 4: Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables aux investissements nécessaires**

### **Priorité 5: Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie**

#### **5.2 Priorités de recherche/maturité des technologies**

Il est probablement encore trop tôt pour que toutes les feuilles de routes complètes soient structurées par les GP de l'ANCRE. Celles-ci seront élaborées et affinées dans le cadre de la future Stratégie Nationale de Recherche. Les scénarios présentés dans ce rapport constitueront l'un des moyens d'en définir la pertinence et la hiérarchisation, selon les orientations qui seront données par la loi sur la Transition Énergétique.

##### **5.2.1. La maîtrise de la demande**

Si le scénario **SOB** est le plus exigeant en termes de progrès technologique en matière d'efficacité énergétique pour l'ensemble des usages de l'énergie, les attentes resteront fortes dans les scénarios **DIV** et **ELE**.

Dans le **bâtiment (résidentiel et tertiaire)**, les axes de recherche visent d'abord à l'amélioration du rapport coût/efficacité des travaux de rénovation thermique dans le bâtiment ancien et la performance énergétique des constructions neuves. À côté de la recherche sur les matériaux (isolants de faible épaisseur, bétons bas carbone, etc...), des progrès sont indispensables en matière de conception et d'industrialisation de la réalisation des travaux. Sur ce deuxième volet, l'amélioration des mesures de consommation réelle constitue un verrou important (notamment pour aider aux évolutions comportementales, vérifier le respect des normes et permettre les calculs économiques) tout comme le déploiement de technologies dans le domaine de l'efficacité énergétique active (instrumentation, gestion technique du bâtiment...). En outre, une approche intégrée doit être recherchée. Le projet SIMBIO, reposant sur des outils de simulation numérique et hybride couplés aux logiciels de maquette numérique et d'information sur les propriétés des produits industriels illustre le type d'innovation et de recherche à engager pour atteindre cet objectif. Des progrès rapides sont essentiels pour atteindre les objectifs de réduction de la demande, tant pour faciliter le financement des projets à réaliser – par une meilleure prévisibilité et une amélioration des gains en efficacité énergétique – que pour développer une offre compétitive et limiter les goulots d'étranglement potentiels liés à l'importance des besoins d'investissement et de financement nécessaires.

Dans le **domaine du transport**, notamment automobile, les enjeux pour la recherche sont de réduire fortement la consommation des véhicules et de permettre les substitutions de carburants, tout en développant des concepts propres à dynamiser l'industrie française. Dans les domaines automobile et ferroviaire, les thématiques contribuant à l'objectif d'efficacité énergétique vont de l'allègement des structures et de la résistance aux frottements, à l'assistance à la conduite en passant par la gestion de l'énergie embarquée. Ainsi, le développement des véhicules électriques et piles à combustible constitue un sujet central, visant respectivement l'amélioration des performances des batteries embarquées et de la filière hydrogène/pile à combustible. La conception et la mise en œuvre optimisée des infrastructures de recharge, rapide et lente, sera un élément-clé d'un déploiement rapide des véhicules électriques. La substitution des produits pétroliers par des hydrocarbures « verts » pose peu de problèmes en termes d'évolution des véhicules (moteurs flexifuel): par contre, ce sont les chaînes



de production, depuis la ressource initiale en biomasse, qui devront être développées de façon très significative. Au-delà, des programmes de recherche portant sur l'optimisation globale des systèmes (organisation des transports/développement de l'inter-modalité/conception de véhicules adaptés aux besoins et/ou polyvalents), reposant notamment sur les technologies de l'information et de la communication et le développement d'outils de modélisation et des démonstrateurs, seront nécessaires.

Pour le **secteur industriel**, que les scénarios de l'ANCRE placent dans une perspective affirmée de croissance, les axes de R&D majeurs visent :

- i. l'usine, avec la mise au point de composants et procédés améliorés, avec un objectif de mise sur le marché à l'horizon 2020-2025 (voire 2030 pour les une partie des procédés),
- ii. la métrologie et le pilotage dynamique des équipements, pour un déploiement vers 2025,
- iii. l'optimisation des flux au sein des écosystèmes industriels y compris le recyclage des effluents (chaleur fatale, matériaux, CO<sub>2</sub> ...) avec la perspective de premiers démonstrateurs d'ici la fin de cette décennie et la nécessité de lever des verrous technologiques pour une gestion optimisée de la chaleur (conception de systèmes de récupération et de transformation de la chaleur).

## 5.2.2. Priorités de recherche pour une offre de technologies compétitives de production de vecteurs énergétiques

Les scénarios de l'ANCRE tablent sur un développement massif des énergies renouvelables. L'enjeu majeur pour la R&D est de contribuer à une émergence rapide de filières nationales compétitives sur la scène internationale et aboutissant à des conditions d'insertion dans les systèmes énergétiques -et in fine à des coûts de production de l'énergie- soutenables.

Dans le domaine de **l'énergie solaire**, la compétition internationale est intense et a abouti à une réduction importante des coûts et à une amélioration des rendements des cellules. Les technologies sont désormais matures tout en étant appelées à encore évoluer de façon significative, notamment dans le domaine du photovoltaïque avec concentration. Les progrès technologiques (réduction des quantités de matière, augmentation des rendements, optimisation des systèmes, impacts environnementaux, durabilité des installations... et poursuite de la baisse des coûts) sont, dans ce cadre, déterminants pour permettre aux industriels français de proposer des produits compétitifs sur l'ensemble de la chaîne de valeur (de la cellule au système de production) en jouant sur les synergies potentielles. En outre, afin de faciliter la gestion des réseaux de transport d'électricité, les filières solaires appellent le développement d'outils de modélisation numérique pour l'évaluation et la prévision de la ressource et la mise en œuvre de solutions de stockage de l'énergie.

Le scénario **ELE** suppose un effort renforcé autour de ces **filières énergies marines** pour ramener rapidement leurs coûts à des niveaux qui apparaîtraient économiquement dans la « zone de compétitivité » attendue dans les décennies 2030 à 2040 (< 100 €/MWh).

Les **énergies marines** recouvrent un ensemble de filières technologiques (hydraulique, hydrolienne, houlomotrice, filière énergie thermique des mers, éolien off-shore posé ou flottant) qui – à l'exception de l'hydraulique et de l'éolien off-shore posé, arrivées au stade de démonstrateur ou de R&D sur verrous – sont encore éloignées de la maturité. Compte tenu du potentiel de la France pour ces énergies, l'articulation de politiques de R&D, y compris à travers la construction de démonstrateurs, et de soutien au déploiement de ces filières pourrait permettre l'émergence d'une offre industrielle compétitive avec des perspectives à l'international. Le développement d'outils d'évaluation de la ressource et de prévision de la production apparaît nécessaire pour réduire les contraintes liées à l'intégration sur le réseau électrique de ces sources de production variables.



La biomasse, et plus globalement la **filière des bioénergies**, est particulièrement mobilisée dans le scénario **DIV**. La réponse de l'offre domestique à la demande énergétique nécessite l'optimisation des systèmes existants, de l'analyse de la disponibilité de la ressource à son exploitation durable grâce à des technologies matures – de type cultures dédiées, mécanisation – ou en voie de développement. Celles-ci peuvent permettre dans un horizon relativement court (2020-2025) d'accroître de façon significative les quantités mises sur le marché. L'accessibilité de zones difficiles demandera de trouver des solutions innovantes qui devront être effectives dès avant 2030. Des solutions de type organisationnel pour l'accès à la biomasse devront également être trouvées pour que le coût de la ressource domestique permette d'atteindre la rentabilité des filières afin d'éviter un recours massif aux importations. L'atteinte des objectifs du scénario **DIV** à l'horizon 2050 suppose un début de production de biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération en fin de période.

Les procédés ont des degrés de maturité différents : si les programmes de recherche visent l'optimisation en ce qui concerne la production de chaleur et la cogénération biomasse, dans le domaine de la production de biocarburants de deuxième génération, il s'agit de mettre au point des technologies en vue d'un déploiement industriel vers 2025. Le développement des procédés thermochimiques permettant de produire des biocarburants de seconde génération ou de l'hydrogène, nécessite encore de lever certains verrous liés à la gestion des composés inorganiques et autres polluants, à la variabilité des propriétés de la biomasse entrante et à l'intégration et optimisation énergétique de l'ensemble des procédés. Par ailleurs, les procédés biochimiques requièrent la levée de verrous liés à la complexité de la déconstruction de la biomasse ligno-cellulosique, à la sélection, au développement et à la maîtrise du coût de production des micro-organismes et/ou enzymes ainsi qu'à l'intégration de l'ensemble des procédés.

Dans le **domaine de la géothermie**, au-delà de l'exploitation des gisements de haute température en contexte géologique volcanique ou de basse température en bassin sédimentaire – voire de très basse température assistée par pompe à chaleur –, gisements pour lesquels les technologies sont matures, les enjeux sont de développer une nouvelle génération d'opérations géothermiques (Engineered Geothermal Systems) permettant d'exploiter les ressources non conventionnelles de faible enthalpie. Dans cette perspective, des démonstrateurs seront nécessaires.

Quel que soit le scénario, **l'énergie nucléaire** constituera une part importante dans le bouquet énergétique de notre pays pour les décennies à venir. La France dispose d'une filière compétitive, et fortement exportatrice contribuant à la richesse nationale. Les programmes de R&D doivent permettre de poursuivre l'amélioration de la sûreté du parc existant (sûreté, possibilité d'augmentation de la durée d'exploitation des réacteurs et usines du cycle) et celle du conditionnement des déchets radioactifs, tout en préservant la compétitivité de cette filière. Il s'agit également de poursuivre les études destinées à l'adapter à un système énergétique laissant une place importante à des énergies renouvelables variables et, plus particulièrement pour le scénario **DIV**, de développer la cogénération nucléaire.

La poursuite de l'optimisation des réacteurs de la troisième génération des réacteurs à eau et des usines du cycle du combustible associées est aussi un enjeu d'importance pour accompagner les industriels français, notamment à l'export. Pour la fin de la période, l'enjeu principal est de préserver l'avance technologique française dans le domaine des réacteurs et de la fermeture du cycle du combustible, à laquelle concourent les programmes de recherche sur le nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération autour du démonstrateur technologique ASTRID. L'expertise française et son avance technologique constituent des atouts majeurs qu'il apparait essentiel de maintenir, notamment à travers des programmes de recherche ambitieux en particulier dans les domaines de la simulation/modélisation, la recherche sur les matériaux, la chimie et l'instrumentation dont les retombées sont internationales. Enfin, la recherche dans le domaine de la fusion nucléaire doit être poursuivie dans un objectif de plus long terme.



Si toutes les trajectoires étudiées pour la France cherchent à réduire massivement l'appel aux **combustibles fossiles**, ceux-ci resteront encore prépondérants dans l'approvisionnement en énergie primaire au niveau mondial. La France dispose d'un secteur parapétrolier et para-gazier (hors compagnies pétrolières et gazières) parmi les plus performants au monde.

Il s'agira de poursuivre les développements technologiques permettant de maintenir, voire d'accroître leur part de marchés en maintenant des programmes de recherche sur les grands enjeux technologiques des services et équipements pétroliers et gaziers des années à venir. Il convient de rappeler qu'une part importante de ces technologies trouve ou pourront trouver des applications dans le développement des énergies renouvelables (technologies liées à la production offshore, outils de visualisation ou modélisation du sous-sol etc.) domaine dans lequel la moitié des entreprises du secteur cherchent de futurs relais de croissance.

### 5.2.3. Priorités de recherche visant l'efficacité du système énergétique

Quel que soit le scénario, le déploiement massif des énergies renouvelables variables et en partie distribuées nécessitera une optimisation de l'ajustement de l'offre à la demande énergétique (quelle que soit sa nature), tout en garantissant la fiabilité de la fourniture d'une énergie peu carbonée pour un prix de revient acceptable. Les scénarios **DIV** et, à un moindre degré **SOB**, tablent sur une capacité élevée à jouer des inter-conversions entre vecteurs (limitée à l'électricité et la chaleur pour le scénario **SOB**, étendue à la filière H2 et au « power to gas » dans le scénario **DIV**). Le scénario **ELEC** est plus ambitieux en matière de renforcement de l'intelligence et des performances des réseaux d'électricité. Le stockage massif inter-saisonnier constitue une rupture technologique majeure dans le scénario **ELE**.

Le stockage de l'énergie, l'inter-conversion entre vecteurs (hydrogène, gaz hydrocarbonés, électricité, chaleur), le développement de réseaux énergétiques intelligents et leurs interopérabilités sont les enjeux technologiques-clé pour la réussite de ce déploiement avec des exigences fortes en matière de sûreté, de résilience des réseaux et de cyber-sécurité. Les **“coûts systémiques” des ERV** se montent actuellement à plusieurs dizaines d'euros/MWh et doivent absolument décroître pour que ces énergies trouvent toute leur place dans le MIX français et européen. Une des solutions qu'il faudra mettre en œuvre à grande échelle pour dépasser un taux d'ERV dans la production significativement supérieur à 20%-30% (en ordre de grandeur) est le stockage à grande échelle de l'énergie électrique, en lien avec les autres systèmes énergétiques (gaz, chaleur).

Les technologies de **stockage de l'énergie électrique** se heurtent à plusieurs verrous :

- i. les performances techniques – et notamment la durée de vie et le rendement qui pèsent fortement sur les coûts du kWh stocké –,
- ii. le coût des matériaux, particulièrement pour les stockages électrochimiques,
- iii. l'intelligence de la gestion de chaque type de stockage, qui est un élément essentiel à la fois pour l'économie et la sûreté de ce stockage mais aussi pour sa durée de vie. Le développement des technologies de stockage de l'électricité passe également par la construction de filières nationales qui devront s'appuyer sur des modèles technico-économiques validés à l'échelle du système électrique, voire énergétique.

**Les recherches sur les différentes formes de stockage** méritent d'être mieux organisées. L'ANCRE y prendra sa part. La recherche des synergies possibles entre les différentes énergies est aussi un axe qui devra être exploré et précisé dans les années futures.

**S'agissant des réseaux électriques intelligents**, les verrous concernent la capacité à anticiper l'offre et la demande, à suivre en temps réel l'état du réseau, la définition et la mise en œuvre de nouvelles architectures de réseau (dont cellules locales), plus de souplesse dans le contrôle-commande du réseau, et le développement de méthodes physiques et/ou numériques pour assurer la stabilité et la



sécurité du réseau, y compris cyber-sécurité, ainsi que la sécurité du traitement et de l'utilisation des données.

**Par ailleurs une vision et un suivi global des flux énergétiques au sein des différents réseaux d'énergie** doivent être élaborés ainsi qu'une gouvernance permettant de rationaliser les conversions possibles d'un vecteur d'énergie à l'autre (électricité, H<sub>2</sub>, chaleur, gaz) et d'assurer la stabilité et l'efficacité au moindre coût de l'approvisionnement énergétique. En particulier, **l'hydrogène est un vecteur qui pourra s'avérer une composante très utile** du système énergétique des décennies 30 et 40. Il peut en effet jouer des rôles multiples : stockage de l'énergie, acteur de la gestion de l'intermittence électrique (notamment via la production par électrolyse haute température réversible), carburant automobile, élément chimique entrant dans la production de différents produits (notamment des biocarburants), composante du gaz de réseau (Hytane)... Ainsi, les technologies d'électrolyse de l'eau font l'objet d'importantes recherches dans le monde entier dans la perspective d'un développement à grande échelle. La production d'hydrogène par transformation thermo-chimique de la biomasse requiert des efforts pour en réduire le coût. Dans le domaine des piles à combustible, des recherches d'envergure doivent être poursuivies afin d'accroître la durée de vie des piles ou électrolyseurs, d'en réduire les coûts et d'accroître leur fiabilité. Ainsi, le développement de piles à combustible réversibles en électrolyseur permettrait de faciliter cette inter-conversion souhaitée entre électricité et hydrogène tout en minimisant les investissements nécessaires.

**La levée de ces différents verrous passe en particulier par le développement de moyens de modélisation** adaptés aux réseaux d'énergie (électricité, mais aussi gaz et chaleur), afin de prendre en compte leurs nombreuses contraintes : temps réel de l'adaptation offre/demande, contraintes économiques, optimisation géographique (du local jusqu'au niveau du continent), stabilité de systèmes couplés (couplage entre réseaux et couplage aux réseaux télécoms), optimisation des nouvelles architectures de réseau, sûreté, etc...

**Les verrous des réseaux de chaleur** sont assez semblables avec l'intégration des énergies variables, l'usage optimal des rejets thermiques des sites industriels ou de production électrique, le stockage (journalier, inter saisonnier) et l'adaptation offre/demande en temps réel. Mais ils conduisent de plus à poser la question d'une gestion plus locale des systèmes énergétiques, non seulement dans l'ajustement offre-demande, mais aussi dans la mobilisation des ressources et la conception des infrastructures.

**L'optimisation du système passe également par une gestion et un pilotage intégrés multi-secteurs et multi-échelles**, soit une approche systémique en interaction avec l'espace européen. La mise au point d'outils, mais aussi de méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux par exemple (en temps réel, ex-post ou ex-ante) permettront aux utilisateurs (du particulier aux autorités publiques et industriels) de disposer d'éléments d'aide à la décision permettant de valider/d'infirmer/de réorienter/de piloter les choix technologiques. Des espaces de mise en commun de retours d'expérience paraissent être une des modalités possibles pour avancer dans la maîtrise de la demande. Ces approches « collaboratives » se retrouvent également du côté de l'offre (section suivante), et constituent un des leviers possibles d'orientation de la recherche pour la transition énergétique au plan local notamment.

#### **5.2.4. Options destinées à compenser les risques en matière d'approvisionnement liés à la transition énergétique**

Dans tous les scénarios, la part du gaz dans le bilan énergétique reste significative. La demande de pétrole diminue, néanmoins, compte tenu de la hausse du prix du brut la facture pétrolière augmente. Dans ce contexte, la question de disposer de ressources nationales **d'hydrocarbures non conventionnels** se pose tant pour réduire notre dépendance énergétique que pour réduire le coût des



importations. Ces considérations invitent à lancer des études visant, a minima, à évaluer le potentiel des ressources en place et les possibilités d'une exploitation économique acceptable sur le plan environnemental et sociétal. Des programmes destinés à optimiser les technologies existantes de fracturation hydraulique, et en particulier à en contrôler sévèrement l'impact environnemental, ainsi qu'à explorer des techniques alternatives devraient être envisagés.

Le développement massif et la production nationale des équipements pour les EnR supposeront la mise en œuvre de quantités importantes de **ressources minières en métaux et minéraux** qui, pour l'essentiel, sont importées.

Pour l'ensemble des ressources naturelles non renouvelables, quatre grands axes de recherche pourraient être développés :

- i. mieux connaître le potentiel national primaire (notamment ultra-marin) et secondaire et améliorer les technologies d'extraction et de raffinage d'une part et de recyclage d'autre part ;
- ii. évaluer les besoins et les réduire, notamment lorsqu'il s'agit des ressources les moins abondantes ;
- iii. promouvoir les techniques de recyclages ;
- iv. développer l'écoconception.

### 5.2.5. Remédier à l'impact de l'utilisation des hydrocarbures sur les émissions de GES : la CSC-CUC

Le recours à la **capture du CO<sub>2</sub>** émis lors de l'utilisation d'énergies fossiles pour la production d'électricité et dans certaines industries est indispensable dans le scénario **SOB** et utile dans le scénario **DIV** dans la mesure où des sources d'émissions concentrées de CO<sub>2</sub> demeurent. Les recherches viseront à l'amélioration des performances technico-économiques, énergétiques et environnementales des procédés de captage (postcombustion, précombustion et oxy-combustion), l'application aux unités des industries fortement émettrices (aciéries, cimenteries, raffineries), le fonctionnement en mode flexible, les technologies membranaires, etc.

Dans le domaine du **stockage du CO<sub>2</sub>**, au-delà de la problématique de la perception sociétale, les principaux verrous technologiques sont la faisabilité technique et la sécurisation des systèmes de stockage à long terme, qui nécessitent des recherches dans les domaines de la caractérisation des sites, de la modélisation de l'injection de CO<sub>2</sub> et de son devenir dans le temps, du suivi de sites et de la gestion des risques et de la sûreté à long terme.

Enfin, dans le domaine de la **valorisation du CO<sub>2</sub>**, les procédés visant à stocker de l'énergie intermittente pour la réutiliser sous différentes formes (gaz de synthèse par méthanation, liquides ou électricité) ou à produire des molécules et matériaux d'intérêt restent à investiguer pour en minimiser les coûts énergétiques, économiques et environnementaux. Ces recherches devront nécessairement être complétées par des expérimentations sur site (plate-forme de stockage géologique) et des démonstrateurs de valorisation du CO<sub>2</sub>.

## 5.3 Financement de la recherche dans le domaine de l'énergie et implication de l'ANCRE

Au regard de ses principaux compétiteurs membres de l'OCDE, la France, avec un budget public d'environ 1 G€/an, se situe, en termes d'effort rapporté au PIB (0,05%), dans une situation intermédiaire, proche de celle de la Corée. On peut noter toutefois qu'au cours des 10 dernières années,

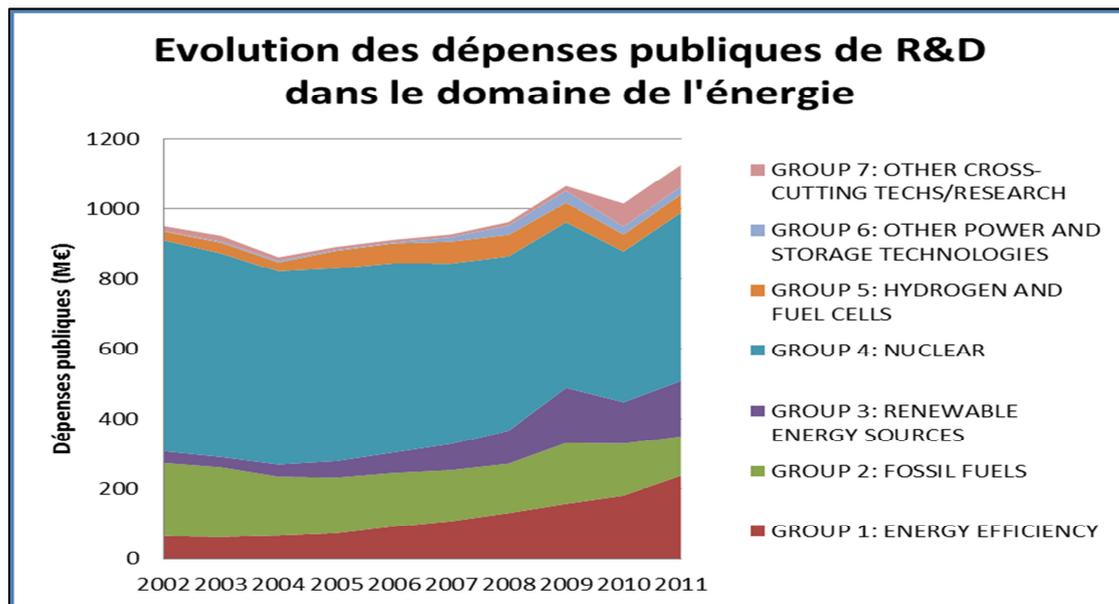


la dynamique d'augmentation de la dépense publique est beaucoup plus forte en Allemagne (+150 % sur la période 2002-2011) ou au Royaume-Uni (après certes une forte diminution à la fin des années 90 mais avec une inflexion forte en 2008) qu'en France (+ 18 % sur la même période). La tendance est également à la hausse aux Etats-Unis, avec un pic en 2009 lié à l'*American Recovery and Reinvestment Act*. Ainsi, à l'exception notable du Japon dont les dépenses, bien qu'en baisse, restent très élevées (+ de 3 G€), malgré le contexte de crise économique, les révisions de politiques énergétiques se sont traduites dans nombre de pays par des augmentations significatives des dépenses de R&D dans l'énergie.

S'agissant de la recherche privée, les volumes sont difficiles à estimer, les chiffres annoncés par les grands industriels de l'énergie excédant très largement les données collectées par les administrations. Il est clair cependant que pour les acteurs de dimension internationale, les efforts de R&D sont consentis pour une large part à l'étranger.

### 5.3.1. Les évolutions du financement de la recherche dans l'énergie en France

La dépense publique de R&D en France n'a que très légèrement évolué à la hausse dans les dernières années. En revanche, des arbitrages ont d'ores et déjà été opérés pour accompagner l'évolution de la politique énergétique, entraînant des réductions significatives des budgets consacrés aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire.



Données AIE, graphique ANCRE

La dépense privée est relativement difficile à établir. Les données collectées par le ministère de l'enseignement supérieur et de recherche permettent de chiffrer celles-ci à un peu moins d'un milliard d'euros sur les dépenses de R&D énergétiques seules, soit un total d'à peine deux milliards d'euros pour les dépenses de R&D publiques et privées.

A l'aune du coût de la transition, qui est pour tous les scénarios de l'ordre du millier de milliards d'euros, les dépenses de R&D cumulées d'ici 2050 ne représenteront que quelques pour cents du total, et bien peu de pour cents de la dépense énergétique totale. Or il faut rapporter ces montants à l'accélération sans précédent qu'il faudra fournir au plan des technologies.



Dans un contexte budgétaire très contraint, la R&D publique doit rester performante et attractive tout en investissant des domaines plus variés, en soutien de l'innovation par les entreprises françaises. L'enjeu est d'exploiter l'appel créé sur le marché français par la transition énergétique pour favoriser le déploiement d'une offre de solutions (produits et services) nationale compétitive sur la scène internationale. Cette ambition invite à assurer une articulation étroite entre programmes de R&D et déploiement de l'offre de produits et services à travers des politiques adaptées (réglementation, incitations, soutien au développement des PME concernées...).

### **5.3.2. Evaluation du besoin, des pistes de financements et rôle de l'ANCRE**

A ce stade, les besoins en R&D pour l'ensemble des priorités ne sont pas évalués, notamment parce que la loi sur la Transition n'est pas encore votée, pour servir de guide à cet exercice. La recherche devra permettre de s'engager dans la direction choisie pour atteindre le Facteur 4 avec le renforcement du positionnement des équipes de recherche, le déploiement de technologies portées par les industriels français (et vendues également sur le marché international), la valorisation autant que faire se peut des ressources domestiques, et ce à des coûts acceptables pour les utilisateurs. Les priorités de recherche doivent réussir à articuler le temps long et les éléments de plus court terme que demandent les mises sur le marché de technologies plus matures ; cette trajectoire se caractérisera par un ensemble d'actions de recherche qui sera amené à s'ajuster au fil du temps.

Il faudra ainsi articuler les dynamiques temporelles « courtes » (10 à 15 ans) et celles, plus longues, qui nécessiteront, en complément des actions de recherches finalisées dans une optique « market pull », des actions de recherches plus fondamentales qui permettront de développer le socle du portefeuille de technologies des années 2030 et 2040. Cette démarche est nettement plus « techno-push », voire s'inscrit dans une logique de « double inconnue » (technologie et marché). Dans les années qui viennent, il s'agira donc à la fois de faire les bons choix en recherche appliquée ou aval pour dynamiser des technologies prêtes à être développées et de balayer un large spectre de technologies possibles pour le plus long terme, via une recherche justement calibrée et orientée.

En tout état de cause, cette évaluation devra prendre en considération les orientations visant à intégrer d'une part la dimension communautaire de certains programmes et d'autre part à distinguer les programmes relevant spécifiquement de financements publics de ceux appelant, par leur objet, une implication de partenaires industriels. Par ailleurs, les feuilles de routes devraient intégrer les projets à mener dans le cadre de coopérations avec des partenaires étrangers (UE, autres) à travers une approche communautaire visant la recherche de synergies (mise en commun de REX, normalisation, tissu industriel...);

Le développement de projets avec les industriels gagnerait à être davantage soutenu ou favorisé, le cas échéant par des mécanismes ad hoc, à l'instar des conditions en matière de performances des technologies et de mise en œuvre de projets de R&D dans certains appels d'offres (marchés publics, appels d'offres de la CRE), du soutien à l'innovation dans le domaine de l'efficacité énergétique susceptible d'être valorisé dans le cadre des certificats d'économies d'énergies.

Dans ce processus, l'ANCRE devra jouer un rôle de premier plan en mettant l'accent sur un souci d'efficacité dans l'identification des priorités de recherche en France et en veillant à une bonne articulation européenne. Elle contribuera à fixer les priorités et à définir les feuilles de route, dans le cadre des dispositions mises en place par la loi SRE. Elle fera aussi des propositions pour rendre la recherche plus efficace, compte tenu des contraintes budgétaires vives auxquelles le pays est confronté.



## Conclusion

### 1. Principales conclusions sur la Transition

- a) L'ANCRE a proposé à l'été 2012 au Gouvernement de contribuer aux travaux d'élaboration de scénarios d'évolution du bouquet énergétique national et d'évaluation des conditions de leur faisabilité, dans le cadre de la préparation de la loi sur la transition énergétique. Tous ses groupes programmatiques se sont donc mobilisés pendant plus d'un an pour élaborer trois visions contrastées du futur, qui ont toutes pour ambition d'atteindre la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) par un Facteur 4 en 2050, notamment par substitution de l'usage massif des combustibles fossiles et le développement des énergies renouvelables. Ces scénarios sont tous axés sur la recherche de la sobriété et de l'efficacité énergétique poussées à des degrés très significatifs – notamment dans le scénario dit de "Sobriété Renforcée" (**SOB**) – avec une diversification du mix électrique et une part importante d'énergies renouvelables. Le deuxième scénario "Electricité" (**ELE**) postule que la transition énergétique passera par un usage privilégié de l'électricité comme vecteur de décarbonation du système énergétique français. Le troisième scénario "Vecteurs Diversifiés" (**DIV**) choisit de pousser la diversification des vecteurs pour assurer cette décarbonation.
- b) Dans les trois trajectoires étudiées, la demande en énergie primaire par habitant qui augmente de manière constante depuis plusieurs décennies, décroît pour atteindre en 2050 le niveau du début des années 70. La part des énergies fossiles dans la consommation des énergies primaires d'origine fossile est fortement réduite au profit des énergies renouvelables. Ces scénarios conduisent à une diminution de la dépendance énergétique du pays qui passe de 51 % actuellement à 27-36 %, selon les cas.
- c) Le résultat des travaux engagés conduit à estimer que l'atteinte du Facteur 4 (pour les émissions de CO<sub>2</sub> énergétique) est possible dans les scénarios élaborés par l'ANCRE. Mais cette atteinte n'en nécessitera pas moins, quel que soit le scénario, des efforts très importants dans au moins trois directions : les comportements (la réglementation, mais aussi les prix auront un rôle à jouer, avec en contrepoint la nécessité de remédier par une politique adaptée aux conséquences en termes de risques de précarité énergétique), la performance et les coûts des technologies mobilisées, les choix d'aménagement du territoire.
- d) Ainsi, dans chaque scénario, outre des modifications importantes dans les décisions économiques et les comportements avec des conséquences majeures sur la demande, il a été nécessaire de prévoir de déployer, parfois de façon massive, des technologies nouvelles. Dans chaque scénario, des technologies de rupture ont donc été identifiées et on a supposé leur mise en place à grande échelle.
- e) L'effort de recherche et développement doit être orienté d'une part vers les secteurs où les réductions d'émissions de GES sont potentiellement importantes (notamment les transports ou le bâtiment) et en cherchant à maximiser les retombées positives sur l'industrie nationale (la France dispose en effet d'une industrie souvent en position de leader mondial dans des domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire, les STICs...) ; cela en veillant à ne pas dégrader le pouvoir d'achat des ménages, la compétitivité des entreprises et l'endettement public. Cet effort de R&D doit également être orienté vers le développement des sources d'énergie renouvelables pour en réduire les coûts, notamment via l'augmentation de leurs performances. Un dernier volet stratégique est celui de la flexibilité d'adaptation de



l'offre et de la demande d'énergie à travers l'intelligence des réseaux, le stockage, la participation des consommateurs.

- f) L'atteinte du Facteur 4, pour les émissions de CO<sub>2</sub>, ne sera possible que s'il y a une forte mobilisation des pouvoirs publics, qui ont un rôle central à jouer pour stimuler et encadrer la transition énergétique : réglementation, incitations, politique fiscale, organisation, financement et mise en œuvre des programmes de recherche, investissements publics, développement des infrastructures...
- g) L'ANCRE a identifié les principales technologies de la transition énergétique pour les décennies à venir ainsi que les verrous technologiques afférents ; elle a formulé un premier jeu de feuilles de route de recherche en cohérence avec les scénarios élaborés. Les domaines de recherche concernent la demande d'énergie (agriculture, industrie, transport, résidentiel et tertiaire, transformation de l'énergie), l'offre d'énergie (énergie solaire, énergies éoliennes et marines, géothermie, applications de l'énergie nucléaire, énergies fossiles, biomasse...), mais aussi le stockage de l'énergie ainsi que l'évolution des réseaux et des domaines transverses (répartition des ressources en biomasse, matériaux stratégiques pour la transition, recyclage, récupération/mutualisation des énergies entre acteurs...).
- h) Les dynamiques du recours aux technologies nouvelles sont différentes selon les secteurs et la nature des technologies :
  - i. des technologies sont proches de la maturité (certaines EnR, STICs, certaines techniques de mobilité...) et il est capital de monter des opérations de démonstration, avant la phase de rentabilité et de plein transfert à l'industrie, lesquelles doivent être facilitées par les politiques publiques. En particulier, les projets de démonstrateurs au plan des territoires, les réseaux locaux, mais aussi les projets industriels nouveaux (PME et IGCE) devront être favorisés, en interaction avec les populations et les organisations locales et territoriales.
  - ii. les nouvelles technologies actuellement en développement joueront un rôle majeur au plus tôt à partir de 2025-2030. Dans ce dernier cas, pour nombre d'entre elles, la recherche doit concerner des technologies encore en devenir (à TRL - *Technology Readiness Levels*- actuellement encore faibles) et la recherche fondamentale, notamment dans des domaines transverses, pour relever l'essentiel des défis technologiques.
- i) Toutes les analyses indiquent que l'atteinte du Facteur 4 ne se fera pas sans une politique européenne de l'énergie visant à organiser les complémentarités et la cohérence d'ensemble. Ceci est d'abord vrai pour les politiques et marchés fonctionnant en réseau, mais aussi pour les programmes de R&D.
- j) La prise en compte du contexte mondial, déterminera également ce que la France peut et veut faire. Un des points principaux est le prix du carbone et le stade de développement des nouvelles technologies « bas carbone » dans le monde. Ces interrelations qui iront grandissantes renforcent le besoin d'une coordination et d'une coopération internationale ambitieuse dans le domaine des technologies et de la recherche.
- k) Si l'effort public en matière de R&D dans l'énergie reste soutenu<sup>9</sup>, les dépenses des acteurs privés sont très sensibles à la conjoncture, notamment en ce qui concerne les PME et ETI. De surcroît, la demande sociale et les enjeux en termes de développement technologique et d'environnement n'ont jamais été aussi forts. Il faudra augmenter et stabiliser dans la durée

<sup>9</sup> Il est à noter que des pays comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni renforcent leurs efforts publics



l'effort global de R&D énergétique en vérifiant l'efficacité des moyens mis en œuvre et en innovant aussi quant aux modes de financement.

- l) Un enjeu majeur, mais complexe sera de diversifier les programmes, mais aussi de faire des choix :
  - i. il apparaît souhaitable, dans un monde qui sera très incertain, de développer des portefeuilles de technologies long terme diversifiés, avec en amont une recherche fondamentale elle aussi diversifiée,
  - ii. pour les technologies proches de l'industrialisation, il est important de se concentrer sur des technologies qui offrent de réelles perspectives de marché aux entreprises françaises.
  
- m) Le coût de la transition telle qu'envisagée sera élevé (de l'ordre du millier de milliards d'euros pour les investissements sur la période). Pour éviter un impact de moyen/long terme négatif sur l'économie, il est essentiel de veiller à ce que ce coût n'altère pas la compétitivité des industriels nationaux et de permettre aux acteurs économiques français de s'adapter et de bénéficier dans toute la mesure possible des marchés que cette transition créera. A ce stade, l'ANCRE estime que l'effort doit aussi se poursuivre au plan de l'évaluation économique (et multicritère) des scénarios, notamment au plan de la méthode et de l'organisation (avec les parties-prenantes).
  
- n) Le besoin de politiques stables et prévisibles est important, tant pour les industriels pour dimensionner leurs outils productifs que pour les organismes de recherche financés par des fonds privés et publics. Les choix de R&D, axés sur telle ou telle technologie, doivent rester relativement stables à court et moyen termes et ne pas céder exagérément aux « effets de modes »; à l'inverse il convient de ne pas obérer les progrès à long terme en bridant la recherche amont, un bon équilibre devra être trouvé. Dans la nouvelle loi, comme il apparaît illusoire de fixer un cap immuable pour des décennies, c'est aussi le processus de révision des objectifs et des moyens qui devra être décrit avec clarté et fiabilité, en précisant quel sera le rôle des parties prenantes, dont les acteurs « techniques » de la transition : industriels, commissions de normalisation, organismes de recherche...

## 2. Les propositions de l'ANCRE pour les technologies du futur

L'Alliance est organisée en Groupes Programmatiques, dont les principales conclusions sont résumées ci-après :

**GPI. Biomasse** : Le déploiement des technologies de production d'énergie à partir de la biomasse demande d'articuler des recherches sur les filières (programmes de recherche et démonstrateurs) et des actions transverses (de type plateforme collaborative). Du fait des niveaux de maturité différents, le groupe distingue pour les actions filières deux catégories. A court et moyen terme, les thématiques de recherche portent sur 1/ la gestion ou l'élimination de composés inorganiques, de poussières et de goudrons altérant les installations, et l'adéquation de la biomasse avec ses utilisations techniques, 2/ la déconstruction physique, chimique ou biologique de la biomasse ligno-cellulosique, le développement de micro-organismes et/ou d'enzymes à bas coût. Sur un horizon plus long, il s'agit d'étudier à une échelle significative, les procédés de valorisation énergétique des algues et autres bio-organismes (biodiversité, ingénierie des souches, récolte, conduite de procédés, ...). Pour les questions transverses, le groupe recommande la mise en place d'une action R&D pluridisciplinaire (le rôle des SHS est clairement identifié) permettant de répondre aux questions de : disponibilité et pérennité des ressources ; déploiement des technologies dans les territoires pour une valorisation durable de



la ressource (domestique) ; gouvernance et politiques publiques ; simulation et évaluation multicritères des filières (outils et méthodologies).

**GP2. Energies fossiles et géothermiques:** L'évaluation des ressources potentielles du pays, tant d'hydrocarbures de roches mères que de matières premières minérales est à privilégier. Il est important de rappeler qu'avec le développement des nouvelles technologies de l'énergie, la demande en métaux et minéraux augmentera et que malgré les efforts faits pour diminuer la consommation de fossiles, les importations resteront importantes sur la période. La validation de technologies alternatives à la fracturation hydraulique permettant une mobilisation acceptable sur le plan environnemental et sociétal est la seconde étape. La mise en place de sites d'expérimentation à des fins scientifiques sera nécessaire. En matière de géothermie, l'effort devra porter sur le développement de sites expérimentaux et de plateformes permettant de valider les concepts technologiques et de fédérer les acteurs de la filière.

**GP3. Energie nucléaire:** Le parc nucléaire actuel, largement amorti, est un réel atout pour soutenir un développement volontariste des énergies solaire et éolienne (techniquement et économiquement). Au-delà de la seule production d'électricité, l'énergie nucléaire peut se substituer aux combustibles fossiles pour une diversité d'autres applications parmi lesquelles la fourniture de chaleur pour les réseaux de chauffage urbain, la production de chaleur industrielle, et la cogénération d'hydrogène. Ces nouvelles applications qui amplifient les apports potentiels de l'énergie nucléaire à un bouquet énergétique décarboné justifient un effort de recherche important, à but national et pour l'export. Il en va de même pour une nouvelle génération de réacteurs à neutrons rapides (réacteurs de 4ème génération) à même d'inscrire ces différentes productions nucléaires dans une perspective pleinement durable, sans recours aux mines d'uranium.

**GP4. Energie solaire :** Le secteur de l'énergie solaire photovoltaïque est en très forte évolution avec une baisse tendancielle très marquée des coûts. Actuellement, ce secteur est en crise pour des raisons conjoncturelles. Les conséquences sont nombreuses : la nécessité de repenser l'industrie et le modèle d'innovation européens poussant vers une forte différenciation des technologies, une concurrence difficile pour le solaire thermodynamique (qui présente cependant des atouts importants en terme de capacité de stockage thermique et d'hybridation qui lui confèrent un avantage potentiel sur le solaire PV en termes de rapprochement offre/demande) et un profond bouleversement du mode de gestion des réseaux dans la perspective d'une introduction massive d'une énergie de nature intermittente et autoconsommée sans passer par les réseaux de transport. Ce constat renforce la nécessité d'une R&D forte en France mais qui devra se faire de plus en plus à l'échelle européenne. Celle-ci devra s'inscrire dans un cadre politique volontariste et prévisible pour l'ensemble des filières solaires : PV, thermodynamique et thermique car elles gardent tout leur sens dans le mix énergétique équilibré du futur.

**GP5. Energies marines hydrauliques et éoliennes:** les filières technologiques des énergies marines renouvelables sont à des stades de maturité différents mais toutes sont perfectibles, se heurtant notamment à des difficultés communes : rapatriement au rivage de l'énergie produite et maintenance délicate. L'objectif est de faire baisser les coûts de production et/ou de réduire les contraintes à l'intégration dans le réseau électrique par la mise en œuvre de politiques de R&D, mettant en priorité le développement de démonstrateurs, et de développement industriel appropriés. Les gisements disponibles à l'échelle nationale, les acteurs industriels français et les perspectives d'exportation justifient que ces filières bénéficient d'un intérêt particulier.



**GP6. Transport:** Dans le secteur des transports, l'enjeu est le développement de technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules, de diminuer le recours aux hydrocarbures. Les thématiques et les pistes à approfondir sont souvent communes à différents modes de transport : allègement, nouvelles motorisations, récupération d'énergie ... Mais l'effort doit également porter sur le développement d'approches systèmes, englobant véhicule-infrastructure-usage, qui permettent d'imaginer de nouvelles offres de mobilité ou de services autour de la mobilité alternative. Enfin, le rythme des inflexions souhaitées étant en total rupture avec le passé, il conviendra de favoriser l'expérimentation en contexte réel.

**GP7. Bâtiments:** la réussite des objectifs très ambitieux de performance énergétique du bâtiment dans son environnement urbain repose sur une meilleure connaissance des usages, le développement d'innovations technologiques et constructives dans une approche plus systémique, sur la base de nouveaux outils de simulation, d'aide à la décision multicritère et de l'industrialisation permettant une réduction drastique des coûts, et enfin le développement d'une offre massive de formation des acteurs pour permettre à la filière du bâtiment de changer radicalement et atteindre le niveau de performance requis.

**GP8. Industrie et agriculture:** Le groupe recommande de soutenir la R&D et la démonstration de solutions technologiques innovantes en matière de procédés industriels ou agricoles selon 3 axes : sobriété et efficacité énergétique - composants et procédés moins énergivores et systèmes de pilotage optimisés, décarbonation des procédés industriels – intégration directe d'ENR, ou via un vecteur (électricité, chaleur, hydrogène...), optimisation des flux et recyclage - écosystèmes industriels, récupération / transformation d'énergies fatales, réutilisation / recyclage des déchets dont le CO<sub>2</sub>.

**GP9. Prospective énergétique globale:** Le groupe a identifié un certain nombre d'axes de recherche nécessaires pour faire progresser les connaissances utiles en sciences économiques et en sciences sociales dans le domaine de l'énergie : 1°) la connaissance des mécanismes déterminant les vitesses de diffusion des technologies (dont ruptures). Dans ce cadre, un travail collaboratif entre les Alliances Ancre et Athéna est une priorité. 2°) la modélisation des impacts macroéconomiques des scénarios. Il faudra aussi renforcer l'évaluation des conditions d'accompagnement de la transition par des outils adaptés dans la durée, notamment pour évaluer les impacts des scénarios sur l'emploi. 3°) l'évaluation environnementale des scénarios. Les marges de progression dans ces domaines sont significatives, et cela pourrait conduire à un programme de recherche interdisciplinaire entre économie, sciences sociales, sciences de la nature et de l'ingénierie.

**GP10. Réseaux énergétiques et stockage:** l'introduction massive des ENR intermittentes et des usages croissants de l'électricité -dont la mobilité électrique- doit s'accompagner d'une flexibilité croissante des moyens d'adapter en temps réel offre et demande. Cela passe par une forte dynamique d'innovations à l'interface des réseaux d'énergie, des NTIC, du stockage, de l'efficacité énergétique, mais aussi par le développement de nouveaux modèles économiques et l'introduction de nouveaux acteurs. Dans ce secteur vont émerger les nouveaux métiers de l'énergie et de nouvelles perspectives de croissance, y compris à l'export. Pour cela des programmes de recherche complémentaires sont nécessaires à la fois pour développer les technologies de demain et pour favoriser la mise en place d'un cadre institutionnel adapté (approche européenne, nouveaux « market designs »).



### 3. Les propositions de l'ANCRE pour la future loi

- a) L'ANCRE propose de prendre acte du fait que, quel que soit le scénario retenu, l'effort à fournir pour atteindre le Facteur 4 constitue un défi majeur à relever. Il importera donc, parallèlement à l'atteinte de cet objectif, de favoriser les trajectoires avec retour positifs sur l'économie et l'indépendance énergétique, qui sont aussi des critères majeurs.
- b) La technologie française et européenne est appelée à jouer un rôle central dans la transition. L'Alliance propose pour maintenir le niveau d'effort requis en matière de recherche de formuler des objectifs en termes de ratio de la R&D énergétique ramenée au PIB, et notamment d'éviter des effets d'éviction, alors que les enjeux énergie-climat sont cruciaux pour le long terme.
- c) Pour atteindre cet objectif, la loi devrait mettre en place les dispositions permettant d'assurer que la recherche réalise en permanence le meilleur équilibre possible selon plusieurs logiques :
  - i. une répartition équilibrée de l'effort entre les volumes consacrés à l'« amont » et à l'« aval », compte tenu des temps longs de la R&D. A cet égard, le principe d'un soutien public à des démonstrateurs technologiques, d'une taille adaptée et sur une échelle de temps et un niveau d'intégration aux réseaux suffisants pour en tirer les enseignements utiles, avant tout déploiement à grande échelle, doit être reconnu.
  - ii. la recherche d'un portefeuille de technologies large, via une diversification suffisante de la R&D amont, tout en gérant par la R&D aval la bonne adéquation, avec les stratégies industrielles française et européenne.
  - iii. la prise en compte par la loi de différentes formes de soutien à la mise sur le marché des innovations, ainsi qu'à la création et au développement de jeunes entreprises innovantes (fonds dédiés, accès facilité à des plateformes de moyens type Labfab, « small business act »,...)
  - iv. l'effort pour concilier une démarche de recherche ouverte, à champ d'application large, et une bonne prise en compte des choix de société.
- d) L'ANCRE propose de mettre en place dans la loi un processus de révision récurrent des orientations de la trajectoire énergétique et de la R&D associée: il est proposé que l'Alliance y apporte les résultats de la R&D nationale, avec des éclairages sur les évolutions des technologies européenne et mondiale.
- e) L'ANCRE propose de mettre en place à cette fin un dispositif permanent de suivi et d'évaluation des enjeux des politiques de transition, de type observatoire de la transition énergétique. Cette institution serait en charge d'un accompagnement permanent de la transition, axé notamment sur les aspects technologiques, à travers un forum regroupant les experts (acteurs industriels et chercheurs académiques, incluant les prospectivistes) et les parties prenantes (le CGSP, le Ministère de l'Economie et des Finances, les membres du CNDTE,..). Cette institution travaillerait en priorité sur les grands enjeux des choix énergétiques : emploi, balance commerciale, coûts des technologies, impacts environnementaux.



## 4. L'ANCRE se mobilise dans la durée

- a) L'ANCRE continuera à apporter sa contribution à la définition de la politique énergétique française, notamment en ce qui concerne l'adéquation des trajectoires des consommations et des techniques mobilisées. Elle va pour ce faire pérenniser l'exercice de scénarisation, via des actualisations régulières, et aller au-delà du présent travail, tant en ce qui concerne les méthodes elles-mêmes (avec les recherches associées en prospective et en économie) que les résultats, notamment en termes d'évaluation multicritère.
- b) L'ANCRE contribuera de façon très directe à l'élaboration des feuilles de routes en matière de recherche sur les technologies de l'énergie, en appui au gouvernement. Elle continuera à apporter son expertise dans le cadre de la rédaction de la Stratégie Nationale de Recherche et de la Stratégie Nationale de Recherche dans l'Énergie.
- c) L'ANCRE est particulièrement consciente des enjeux liés à l'évolution de la société et à la perception en son sein des enjeux technologiques. Elle se propose de développer les approches en Sciences Humaines et Sociales – au-delà de l'économie qui est déjà très présente – notamment par le rapprochement en cours avec l'Alliance ATHENA qui doit permettre de créer les conditions d'un échange interdisciplinaire fécond. Il est nécessaire de soutenir fortement et dans la durée une recherche à part entière conduite par les Sciences humaines et Sociales (cf rapport SHS et Énergie), en s'appuyant sur la communauté majoritairement réunie au sein d'ATHENA.
- d) L'ANCRE souhaite enfin continuer à participer aux débats relatifs à la transition énergétique, pour laquelle elle s'implique activement dans la recherche. Elle considère qu'une part de son rôle est aussi informatif et pédagogique. Elle mènera des actions dans ce but et fournira à un large public les informations qu'elle aura élaborées.



## Annexe 1 : Détails sur le passage des émissions de CO<sub>2</sub> énergétique aux émissions « tous GES »

### Les étapes

L'évaluation « tous gaz à effet et de serre – GES » se fonde sur les inventaires des émissions de polluants atmosphériques en France réalisés par le CITEPA pour le Ministère de l'Ecologie conformément aux engagements et exigences internationaux et nationaux, selon le format CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques). Les principales conséquences sont

- La déduction des soutes internationales (transports maritime et aérien)
- L'ajout des sources d'émissions autres que la consommation d'énergie, à savoir le CO<sub>2</sub> non fossile (cimenteries, verrerie, sidérurgie, chaux, tuiles et briques) ; le CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (agriculture principalement, énergie, déchets, procédés industriels) ; les HFC (climatisation, aérosol), PFC ; les productions d'aluminium) et SF<sub>6</sub> (industrie du magnésium, équipements électriques) ; émissions fugitives (pertes dans le transport de gaz, déchets et solvants)

### Les évaluations

L'évaluation tous GES est réalisée hors émissions liées à l'utilisation des terres, à leur changement et à la forêt (UTCF) en équivalent CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) en se fondant sur les coefficients de conversion CITEPA/CCNUCC.

### Les effets généraux étudiés : principes généraux et limites

Les effets étudiés devraient combiner systématiquement les évolutions des activités et les changements des procédés (intrants utilisés), or ceci n'est pas le cas :

- Pour l'industrie : les scénarios ANCRE se différencient non pas par l'activité (en termes d'unités produites) mais en termes d'intensité énergétique
- Pour l'agriculture : on se fonde sur un artefact (utilisation d'évaluations d'autres études: ADEME et INRA) en faisant des analogies avec les quantités d'offre pour la valorisation énergétique.

### 2.2 La réfaction :

#### **Soute internationale**

L'évaluation initiale ANCRE prend en compte un équivalent CO<sub>2</sub> de toutes les énergies consommées dans le transport pour permettre une évaluation des émissions associées à leur fabrication en raffinerie dans le bilan global. Le trafic international aérien et maritime étant exclu des inventaires, les émissions associées ont donc été déduites afin d'ajuster cette valeur.

### 2.3 Les ajouts gaz par gaz

#### **CO<sub>2</sub> non fossile**

Les émissions de CO<sub>2</sub> proviennent de l'utilisation des combustibles et de la décarbonatation (CO<sub>2</sub> non fossile). Les principaux secteurs de décarbonatation sont :

- Cimenteries (clinker<sup>10</sup>)

<sup>10</sup> Constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange d'acide silicique d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux. Moulé puis additivé avec des laitiers de hauts-fourneaux par exemple, le clinker sert à fabriquer le ciment, entrant lui-même dans la liste des constituants du béton

([http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/clinker.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/clinker.php4))



- Verreries
- Sidérurgies (castine)
- Producteurs de chaux
- Tuiles et briques

La liste suivante représente l'ensemble des activités émettant du CO<sub>2</sub> hors énergie

<b>Produits minéraux (CRF 2A)</b> Ciment décarbonatation (2A1)* Chaux décarbonatation (2A2) Utilisation de calcaire (2A3) Carbonate de soude (2A4) Autres - Verre décarbonatation (2A7.1)* Autres - Tuiles et briques décarbonatation (2A7.2)
<b>Chimie (CRF 2B)</b> Production d'ammoniac (2B1) Production d'acide nitrique (2B2) Production d'acide adipique (2B3) Production et utilisation de carbure de calcium (2B4) Autres (2B5)
<b>Métallurgie (CRF 2C)</b> Procédés de la sidérurgie*, de la transformation de l'acier et des cokeries (2C1) Production de ferroalliages (2C2) Production d'aluminium (2C3)* Production de magnésium (2C4)

Les activités avec \* sont celles qui ont pu bénéficier d'un calcul spécifique sur l'évolution de la production (en Mt) et/ou sur les technologies. Les produits minéraux ont plus particulièrement été étudiés.

Les émissions des autres activités sont liées aux tendancielles 1990-2011 sans information scénarisée de l'évolution de la production à 2050.

Le rapport CCNUCC (2013) donne les valeurs des facteurs d'émission induits du CO<sub>2</sub> pour la décarbonatation dans le secteur du ciment (kg CO<sub>2</sub>/ t clinkers) et celui de la chaux (kg CO<sub>2</sub> / t chaux) pour 6 années dont 2010. Ces deux activités sont mises en exergue car la décarbonatation représente plus de 60% des émissions de CO<sub>2</sub> du ciment et plus de 70% pour la chaux.

La décomposition des secteurs d'activités dans ANCRE permet d'avoir les évolutions de la production pour trois des secteurs concernés par la décarbonatation (pas de temps de 10 ans). Manque la chaux qui en 2011, représentait la 35ème catégorie clé d'émission de CO<sub>2</sub> (0,4%).



Secteurs industriels ANCRE	Modalité de calcul CO <sub>2</sub> non fossile
<b>Sidérurgie</b>	Approche % SECTEN Même si dans le rapport CCNUCC (2013), on ne trouve pas directement d'équivalent kg CO <sub>2</sub> /unité de la sidérurgie, le rapport SECTEN (2012) donne la part du CO <sub>2</sub> issu de décarbonatation sur le total (p 41) qui est de l'ordre de 5% ; on peut donc augmenter par ce biais les émissions de CO <sub>2</sub> de la sidérurgie en utilisant les hypothèses ANCRE sur les combustibles et en utilisant la répartition 2011 des énergies utilisées dans la sidérurgie sur toute la période (p. 99).
<b>Clinker</b>	Approche mixte L'évaluation repose sur l'évolution de la production (disponible dans les scénarios ANCRE), le facteur d'émission et la part clinker dans le ciment. Les perspectives de réduction de facteur d'émission en kg CO <sub>2</sub> / t clinker selon le LCPC est de la moitié à 2020 (0.52 vs. 0.26) <sup>11</sup> . Ce taux paraît élevé d'où une réduction posée a priori de 2/3 du niveau de 2010 à 2050. La part clinker/ciment est de l'ordre de 80% et on peut viser 71% selon la Roadmap 2050 <sup>12</sup> . Linéarisation sur la période.
<b>Verre</b>	Approche mixte L'évolution de la production lié aux scénarios ANCRE et aux évaluations ADEME (2013) <sup>13</sup> , , au facteur d'émission [constant sur la période = données disponibles pour le verre neuf issu de CCNUCC (2013), ; on suppose que le facteur verre neuf est utilisable pour toute la production du secteur] et au taux de recyclage qui est de 70% au maximum à 2050 du fait des limites de collecte) <sup>14</sup> (linéarisation sur la période)

Pour les autres secteurs émetteurs de CO<sub>2</sub> non fossile, donc la chaux, on utilise le solde CO<sub>2</sub> non fossile selon CCNUCC 2010 – [clinker + verre] et posé que le profil à 2050 suivait celui du clinker.

## CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O

Les valeurs de PRG utilisées sont de 21 pour le CH<sub>4</sub> et de 310 pour N<sub>2</sub>O.

### 1- Secteur agricole (et forestier)

En 2010, agriculture et forêt représentent 77% des émissions nationale de CH<sub>4</sub> et 85% pour le N<sub>2</sub>O.

#### a. Contexte

Les évaluations biomasses faites pour les scénarios ANCRE n'ont pas été élaborées pour avoir une estimation des GES via l'étude des pratiques et modes cultureux. L'approche a consisté à établir des potentiels fondés sur un usage des sols simple : agriculture et forêt sont traitées de façon indépendante ; la SAU (surface agricole utile) est orientée ressources 1G ou 2G (production primaire ou sous-produits) avec quelques hypothèses de rendements et de taux de prélèvement évolutifs. L'approche forestière est autonome et basée sur un usage restant pour l'énergie après valorisation matière ; la balance commerciale reste relativement constante sur la période (en proportion des quantités). Les cultures dédiées sont évaluées selon un taux d'introduction envisagé par scénario, avec une modulation faite sur les rendements annuels (plus forte pour TCR sur **DIV**).

<sup>11</sup> Habert et Roussel LCPC 2008 cité par <http://www.construction-carbone.fr/emissions-du-ciment-quelles-perspectives/>

<sup>12</sup> Cement Technology Roadmap 2009 : Carbon emissions reductions up to 2050 (WBCSD, IEA, 2010).

<sup>13</sup> ADEME (2013), « L'exercice de prospective de l'ADEME, Vision 2030-2050 », Document technique, 1/297.

<sup>14</sup> ADEME (2012), Déchets – Chiffres clés (p. 25) sur les perspectives : ADEME (2013), « L'exercice de prospective de l'ADEME, Vision 2030-2050 », Document technique, 1/297 (p. 119, 254).



Il s'agit donc d'une évaluation qui vise à établir des quantités de ressources pouvant être transformées en produits énergétiques répondant à des demandes scénarisées.

Cette approche ne fait pas d'hypothèse sur les itinéraires techniques, sur l'allocation globale d'usage des sols (en particulier sur l'élevage qui pourtant est fortement émettrice de CH<sub>4</sub>), sur les systèmes de récolte associés, sur les habitudes alimentaires. Bref, il n'est pas possible de reconstituer des valeurs de GES pertinentes directement sur les données biomasses ayant permis d'élaborer les scénarios ANCRE.

## b. Possibilité d'ajustement

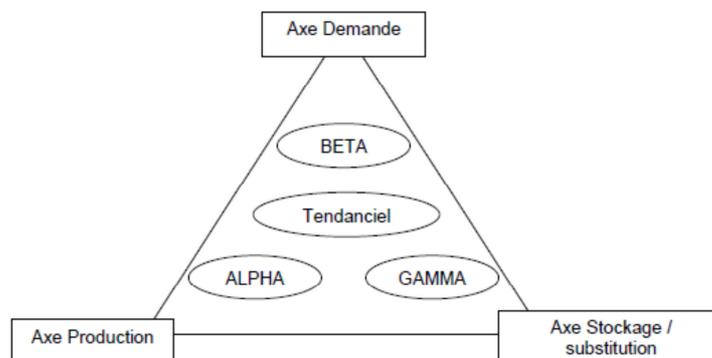
Choix a été fait de regarder les travaux disponibles sur lesquels il serait possible d'établir des correspondances/des analogies. De ce cadre, il a été choisi d'utiliser l'étude Agriculture et Forêt – Facteur 4 faite pour l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture en 2012 qui se base sur une estimation très poussée des GES associés à des scénarios (méthodologie Climagri), mais qui se veut réaliste : « *les scénarios conduisent à une division des émissions de GES compris entre 1.7 et 3.0 (format CITEPA). Notons que l'atteinte du facteur 4 dans les secteurs agricoles et forestiers n'est envisageable que par un scénario de rupture difficilement acceptable, incluant la suppression des exportations, l'afforestation de l'ensemble des terres libérées et une modification plus extrême des régimes alimentaires. Ce scénario n'a donc pas été étudié* ».

- La première étape a été d'identifier le scénario « facteur 4 » le plus proche du scénario **DIV** ANCRE.
- La deuxième étape a consisté à valider (ou non) des ordres de grandeurs.
- La troisième étape a conduit à reprendre les facteurs d'évolution ADEME du scénario choisi pour 2050/2010, sur les données d'émissions agriculture et forêt du CCNUCC pour 2010 (le scope est différent entre la méthode Climagri utilisé par l'ADEME et les données restituées dans les rapports France).
- La quatrième étape a porté sur la possibilité de prendre en compte ou non la trajectoire à 2050 en fonction des hypothèses d'évolution prises dans les scénarios ANCRE. En première approche, on a considéré que c'était linéaire.

## c. Première étape : choix du scénario

Le scénario ALPHA a été choisi car il correspond le mieux à l'esprit des scénarios ANCRE visant à produire de la biomasse pour répondre à une demande matière ou énergétique.

### **Représentation globale des orientations des scénarios Facteur 4**



Source : Facteur 4 (p.15)



## Description qualitative de ALPHA : scénario éco-intensif (p.66)

*La forte demande intérieure et mondiale en produits agricoles et forestiers conduit à privilégier les systèmes les plus productifs, tout en recherchant une forte réduction des impacts environnementaux principalement par l'innovation agricole et technologique (amélioration sensible des processus de fabrication de l'azote, maîtrise des consommations d'énergie dans les bâtiments d'élevage, les serres, le séchage, l'irrigation, augmentation des rendements de machines agricoles). Cette dynamique se traduit aussi par une rupture technique par rapport à l'agriculture conventionnelle : la production intégrée devient la principale forme d'agriculture. Elle est basée sur des principes agronomiques valorisant les ressources abondantes et économisant les ressources rares, se caractérisant par des rotations longues, la biodiversité fonctionnelle, la réduction – voire la suppression – du travail du sol. L'utilisation de cultures intermédiaires (engrais verts) se généralise, tandis que l'agroforesterie et les cultures associées connaissent un fort développement.*

*La productivité annuelle moyenne des vaches laitières est fortement augmentée : elle atteint 7 500 litres grâce à un mix entre une partie extensive basée sur les prairies (part VL 5000) et une partie intensive basée sur une faible part de pâturage et une ration en concentrés importante (part VL 10000). Les granivores restent sur un mode intensif pour optimiser l'indice de consommation. La méthanisation des déjections, résidus de culture, et cultures intermédiaires se généralise. **[80% dans ANCRE]**. Le gaspillage de produits alimentaires et la surconsommation sont réduits, mais le régime alimentaire n'évolue pas significativement. La consommation de produits animaux diminue de manière un peu plus prononcée que dans le scénario tendanciel. Les exportations (notamment céréales et poudre de lait) et les importations se maintiennent au niveau actuel. **[même hypothèse dans ANCRE]** L'exploitation des ressources en biomasse de manière générale est maximisée : forte mobilisation de la paille et des résidus de culture, et surtout des produits forestiers. **[même approche « productiviste » dans ANCRE avec une dimension territoriale poussée dans le scénario DIV qui vise à optimiser la valorisation matière et énergétique et à introduire fortement des cultures dédiées énergétiques]***

## Les principales modifications (p.72)

*Les gains GES sont dus principalement à une amélioration du cycle de l'azote (moins d'azote, plus efficace, moins d'excédent) et des technologies liées. Une agriculture à la fois productive et économe. Les autres gains sont le fait de l'amélioration de paramètres de production (méthanisation, consommation d'énergie, ...). Il n'y a pas de surface libérée dans ce scénario.*

## Les évolutions GES (p.74)

*Dans le scénario éco-intensif (ALPHA), le principal déterminant de l'amélioration du bilan d'émissions de GES par rapport au tendanciel est lié au changement des systèmes de culture, qui permet d'améliorer le bilan des émissions liées au cycle de l'azote, en réduisant les apports d'azote par hectare et en les mobilisant de manière plus efficace dans le processus de production. Les déterminants secondaires qui influencent la réduction des émissions de GES, qui sont mobilisés dans les trois scénarios, sont : une modification légère des régimes alimentaires (réduction des surconsommations et des pertes évitables), l'amélioration de la consommation énergétique dans les exploitations agricoles et dans la fabrication de l'azote minéral ; ainsi qu'une méthanisation quasi-systématique des déjections animales. Il n'y a pas de terres libérées dans ce scénario.*

**Conséquence du choix** : on atteint à peine le facteur 2 pour l'agriculture et la forêt, mais ceci paraît raisonnable au regard des évaluations poussées réalisées dans l'étude Facteur 4 (2011) et aux choix faits dans les scénarios énergétiques ADEME de 2012.



#### d. Deuxième étape : vérification des ordres de grandeur

Pour valider les ordres de grandeur, la clef d'entrée est la répartition en termes de surface.

Dans ANCRE, on a considéré que les surfaces forestières et agricoles étaient indépendantes et qu'il n'y avait pas bouleversement d'usage des sols (en tout cas pas de ruptures aussi poussées que celles que l'on peut retrouver dans certains scénarios, cf. par exemple Afterres). On retrouve ce profil dans le scénario ALPHA avec des surfaces agricoles utiles et forestières stables (respectivement 29 Mha et 16 Mha), une artificialisation limitée. On peut également relever la baisse des surfaces de prairie de l'ordre de 2Mha dans ALPHA qui peuvent être mises en perspective avec les 2.2 Mha de cultures dédiées du scénario **DIV** ANCRE (le plus poussé pour ces cultures)

On peut relever cependant les différences suivantes sur le profil 2050/2010 :

- Surfaces COP (cultures oléagineux et protéagineux) dans DIV = 97%, ALPHA = 107%
- Surfaces en cultures dédiées (agricoles et TCR), **DIV** = 2.2 Mha, ALPHA = 0 Mha (mais 3 Mha pour BETA)

**Problème** : choisir le scénario ALPHA conduit à faire comme si il y avait indifférence en termes de GES des types de culture puisque c'est une donnée moyenne à l'hectare (agriculture ou forêt) qui est utilisée. Risque : on sous-estime peut être les GES liés aux besoins des cultures dédiées. L'idéal serait d'avoir des données unitaires par catégorie de biomasse (par tonne de matière sèche, tonne de matière brute ou ha) afin de pouvoir mieux évaluer les impacts GES des scénarios ANCRE. Par contre, on considèrerait constant les hypothèses sur l'élevage.

#### e. Troisième étape : application des facteurs de réduction aux données CCNUCC

Gg	Origine	CCNUCC Actuel 2010	2050/2010 coef de passage	2050/1990 Facteur de réduction	2050	2050 (MtCO <sub>2</sub> e)
CH <sub>4</sub>	Agr	1853	0,57	2,17	1058,9	22,0
CH <sub>4</sub>	Forêt	84	0,57	2,17	48,0	1,0
N <sub>2</sub> O	Agr	166	0,79	1,37	131,8	41,0
N <sub>2</sub> O	Forêt	4,8	0,79	1,37	3,8	1,2
CH <sub>4</sub> et N <sub>2</sub> O	Agr. et forêt		0,67	1,75		65,2

Note : forêt = changement d'affectation des sols et sylviculture (CRF5)

#### f. Quatrième étape : la trajectoire

Linéariser ferait en sorte qu'on ne tient pas compte des efforts attendus qui sont différenciés en termes de part relative des différentes biomasses et d'introduction des cultures dédiés dans les scénarios. Cependant, ceci demanderait devoir un équivalent GES à la tonne ou à l'hectare de chacune de ces cultures, ce dont nous ne disposons pas. L'approche linéaire a donc été suivie par défaut.

#### g. Choix final

Après comparaison des hypothèses des scénarios ANCRE biomasse fondées sur des potentiels en quantités, le scénario ALPHA de l'ADEME-MAAP (2012) paraît correspondre le mieux à l'approche ANCRE. Cependant, au regard des résultats de l'évaluation INRA (2013) qui atteint les résultats ALPHA 2050 dès 2030 par des nouvelles pratiques culturales notamment, la combinaison des scénarios ADEME qui paraît raisonnable est de mixer ALPHA et BETA dans une proportion de 70% (ALPHA) et 30% (BETA). Cette combinaison permet de se rapprocher des valeurs INRA à 2030 à l'horizon 2050. On peut ajouter une autre raison pour laquelle la prise en compte partielle de BETA paraît pertinente : dans ce scénario BETA, il y a 3 Mha de cultures de biomasse (dans ALPHA, zéro) qui se



rapprochent des 2 Mha de **DIV-ANCRE**. Avec un mixte ALPHA (70%) et BETA (30%), on atteint le facteur 2 à 2050.

## 2- Autres secteurs émetteurs de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O

### L'énergie

- CH<sub>4</sub> : sur les dernières années, la baisse constatée vient de l'arrêt de l'activité minière et de la baisse des consommations de bois de chauffage dans le résidentiel couplée à l'introduction d'équipements plus performants ; CCNUCC 2013 (p.60),
- N<sub>2</sub>O : constant voire en évolution pour l'énergie de 1990 à 2011 ; pour les scénarios, on garde le niveau de 2010 sur toute la période.

### Les déchets

- CH<sub>4</sub> : la mise en décharge est la principale source de cette catégorie. Elle représente 17% des émissions de CH<sub>4</sub> de la France entière hors UTCF en 2011 et plus de 86% des émissions de CH<sub>4</sub> des déchets (p.74) ; le profil de gestion des déchets a connu une inflexion autour de 2000 avec plus de tri et des technologies pour récupérer le méthane. On considère que cette tendance se poursuivra à 2050.
- N<sub>2</sub>O : baisse de 1990-2011 ; cette tendance est conservée à 2050.

### Les procédés industriels

- CH<sub>4</sub> : part relativement faible comparativement aux autres secteurs mentionnées ci-avant ; la tendance à 2050 mixe le profil 2000-2011 en l'accélégrant pour rejoindre le profil déchets (on prolonge les tendances observées depuis 2000, soit une inflexion liées l'augmentation du tri et la mise en place de procédés permettant de récupérer le gaz émis par les déchets enfouis).
- N<sub>2</sub>O : Baisse drastique dans les procédés (catalyseurs, fermeture d'ateliers obsolètes...), on conserve la tendance.

## FC et SF6

### 1- Les données existantes

Dans le rapport CCNUCC (2013) on retrouve

- Pour HFC (p. 60) : climatisation automobile, froid commercial, aérosol, propulseur de mousse
- Pour PFC (p.61) : production d'aluminium par électrolyse, utilisateurs: industries électronique et des semi-conducteurs
- Pour SF<sub>6</sub> (p.61) : industrie du magnésium, fabrication de quelques chaussures de sport, fabrication des équipements électriques.

Dans la nomenclature d'activités émettrice SNAP 97 c (CCNUCC, p. 1125), il est mentionné que l'utilisation du HFC, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, PFC et SF<sub>6</sub> se retrouve dans

060501 Anesthésie

060502 Equipements de réfrigération et d'air conditionné, utilisant des halocarbures ou du SF<sub>6</sub>

060503 Equipements de réfrigération et d'air conditionné, utilisant des produits autres que des halocarbures ou du SF<sub>6</sub>

060504 Mise en œuvre de mousse (excepté 060304)

060505 Extincteurs d'incendie

060506 Bombes aérosols

060507 Equipements électriques (excepté 060203)

060508 Autres



Les statistiques SECTEN permettent de relier ces activités à des secteurs sur 1990-2011 (en kt CO<sub>2</sub>e).

Les principales activités sont

- Pour HFC le tertiaire et les transports routiers (62% du total HFC en 2010)
- Pour PFC, les biens d'équipements, matériels de transport (85% du total en 2010)
- Pour SF<sub>6</sub>, la production d'électricité et la métallurgie des métaux non ferreux (77% du total)

Les évolutions sont très différenciées depuis 1990 :

- HFC : La tendance montre une hausse des émissions due à un développement de certains produits (effet quantité) ou à des effets de substitution (« les HFC de la réfrigération et de la climatisation, pour leurs fortes évolutions à la hausse suite à la substitution des CFC depuis le début des années 1990. CCNUCC, 2013, p. 37).
- PFC : la tendance est à la baisse des émissions (à noter : une certaine stabilité voire remontée sur les dernières années).
- SF<sub>6</sub> : baisse

## 2- Les choix faits

Dans la logique ANCRE de scénarios orientés vers les technologies voire des ruptures, et du fait du contexte (la Commission envisage un programme de suppression des HFC et propose de réduire HFC, PFC et SF<sub>6</sub> de deux tiers d'ici 2030), il a été choisi de poser des diminutions de ces émissions du fait de changement de procédés, ces gaz étant remplacés.

HFC : Les secteurs principaux contributeurs sont liés à la climatisation : il s'agit du tertiaire et transport routier (56% du total). On utilise les tendances faites par le Comité pour la Fiscalité Economique de 2013 à 2030 menées sur des taxes de tCO<sub>2</sub> (20 à 40 euros par tCO<sub>2</sub>). A cet horizon de temps, la tonne de carbone dans ANCRE est de l'ordre de 40 euros. La baisse à 2030 correspond donc à un schéma moyen du Comité. Ce schéma moyen conduit à un niveau 2030 correspondant à 1/3 des émissions de 2010, ce qui correspond à des objectifs globaux (HFC, PFC et SF<sub>6</sub>) qu'a déclaré avoir la Commission Européenne. Celle-ci prévoit aussi un programme de suppression des HFC. Au-delà de 2030, il est donc proposé des facteurs de réduction pour avoir une émission nulle en 2050. On ne tient pas compte de l'évolution de l'activité des secteurs considérés.

PFC : On pose de façon *ad hoc* que la réduction PFC se fera à un rythme deux fois moins rapide que le HFC (plus de difficulté pour trouver une solution de remplacement). On ne tient pas compte de l'évolution de l'activité des secteurs considérés.

SF<sub>6</sub> : on poursuit la tendance (pas d'effet quantité)

### **Emissions fugitives (pertes dans le transport de gaz, déchets et solvants)**

Réduction des émissions fugitives poursuivant les tendances observées.

---

<sup>15</sup> Comité pour la Fiscalité Ecologique (2013), Fiscalité des fluides frigorigènes : enjeux et piste de réflexion, 28 février 2013.



## Annexe 2: Compléments sur la biomasse

L'équilibrage entre offre et demande s'est fait par une ventilation des biomasses vers leurs utilisations, ici énergétiques, par catégorie de produits énergétiques : Carburant 1G, 2G dont bio-SNG, 3G, Chaleur, Electricité, HVO... Ainsi, les technologies et produits énergétiques associés dans les scénarios ANCRE ont été identifiés. Une traduction {technologies/produits énergétiques/taille des unités en biomasse/biomasses et origine de la biomasse (France/Monde)} a été faite. Une attention particulière a été portée à la taille des unités des différentes technologies, car c'est un critère clef pour définir les conditions de structuration de l'offre qu'il est possible d'imaginer. L'approche exploratoire (*forescast*) a été engagée dans un premier temps, puis un ajustement selon l'approche normative (atteindre un objectif et en déduire les quantités) a été conduit sur tous les pas de temps. On a considéré que, du fait de certaines inerties du secteur, les scénarios se différenciaient à 2020, avec une rupture forte attendue vers 2030.

L'approche agricole porte sur un potentiel surfacique et une allocation par culture répondant à une demande, un rendement, un taux de récolte lié à des pratiques de récolte. Cette approche considère que l'offre agricole répondra à une demande par le signal prix. Cette réponse d'offre se retrouve également pour les cultures dédiées (plantes pluriannuelles et Taillis à Courte Rotation). Elle est d'autant plus forte qu'elle s'inscrit dans des contextes où les projets de territoire sont plus marqués (scénario **DIV**); certaines inerties ou réticences au changement sont dans ce cas moindres. Pour la forêt, l'ajustement à la demande énergétique est moins forte du fait du « fameux » (non) consentement à offrir des propriétaires forestière et de l'inélasticité de l'offre. Pour pallier ce problème, on a considéré qu'il fallait une approche de demandes jointes bois d'œuvre/bois d'industrie/bois énergie. En effet l'expérience récente prouve que mobiliser plus avec la seule demande énergétique additionnelle est difficile.

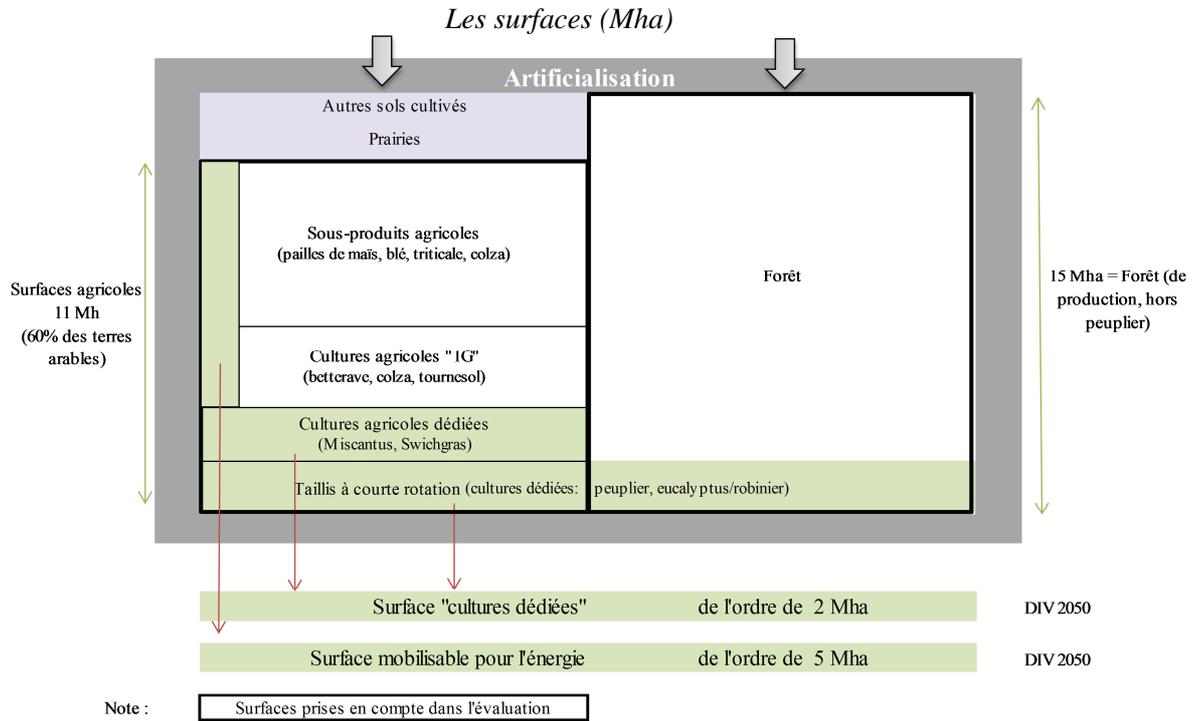
La demande énergétique associée au secteur biomasse est ensuite déduite du comportement d'offre scénarisé (tonnes et hectares par catégorie de biomasse : biomasse agricole, biomasse forestière, cultures dédiées ; tonnes de déchets dont déchets IAA, bois en fin de vie) qui, selon les scénarios, intègre des changements techniques.

Afin d'avoir un bouclage des émissions de GES non fondé exclusivement sur des potentiels quantitatifs en biomasse (choix méthodologique initial) mais sur les secteurs agricole et forestier dans leur globalité, d'autres travaux ont été utilisés (cf. annexe 1) : ADEME-MAAP (2012<sup>16</sup>) et INRA (2013<sup>17</sup>). Choix a été fait de mixer deux scénarios ADEME dans une proportion de 70% ALPHA (scénario le plus proche des évaluations quantitatives ANCRE) et 30% BETA (scénario qui intègre des surfaces en cultures dédiée proche du scénario le plus fort sur cette ressource pour ANCRE). Avec ce mix, on atteint un facteur de réduction des GES à 2050 qui paraît être raisonnable pour le secteur (de l'ordre de 2).

L'évaluation des surfaces des différentes biomasses suit le principe proposé dans le schéma suivant :

<sup>16</sup> ADEME-MAAP (2012), « Agriculture et facteur 4 », Synthèse et rapport.

<sup>17</sup> INRA (2013), « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques », étude réalisée pour le compte de l'ADEME, du MAAF et du MEDDE - Juillet 2013





## Annexe 3 : Complément sur les investissements dans le secteur du Résidentiel-Tertiaire

Les simulations d'évolution des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment sont réalisées au moyen d'un tableau représentant la structure du parc de bâtiment, d'une part, et différents scénarios d'évolution des performances (dispositifs de chauffage et bâti) et des mix énergétiques, de l'autre.

Les principales variables prises en compte sont :

- Type de bâtiment (maison individuelle, logement collectif, tertiaire)
- Dynamique du parc (destruction, construction neuve)
- Scénarios de rénovation (volume de rénovation lourde / légère)
- Performances thermique (neuf, rénové lourd / léger)
- Evolution des parts de marché des énergies (chauffage + ECS)
- La dimension économique n'est pas intégrée à ce stade.
- Besoins en investissement pour rénover le parc de bâtiments dans les différents scénarios

Le chiffrage du coût des programmes de rénovation thermique est effectué dans un deuxième temps pour les différents scénarios étudiés en introduisant une estimation des coûts unitaires de rénovation thermique (€/m<sup>2</sup>).

Le coût global de rénovation résulte donc des hypothèses spécifiques à chaque scénario concernant le volume et le rythme de bâtiments rénovés ainsi que des performances thermiques visées (70% de réduction des consommations de chauffage et d'ECS pour le scénario **SOB**, 60% pour les scénarios **ELE** et **DIV**).

### *Gains par rapport à la consommation de référence (logements et tertiaire)*

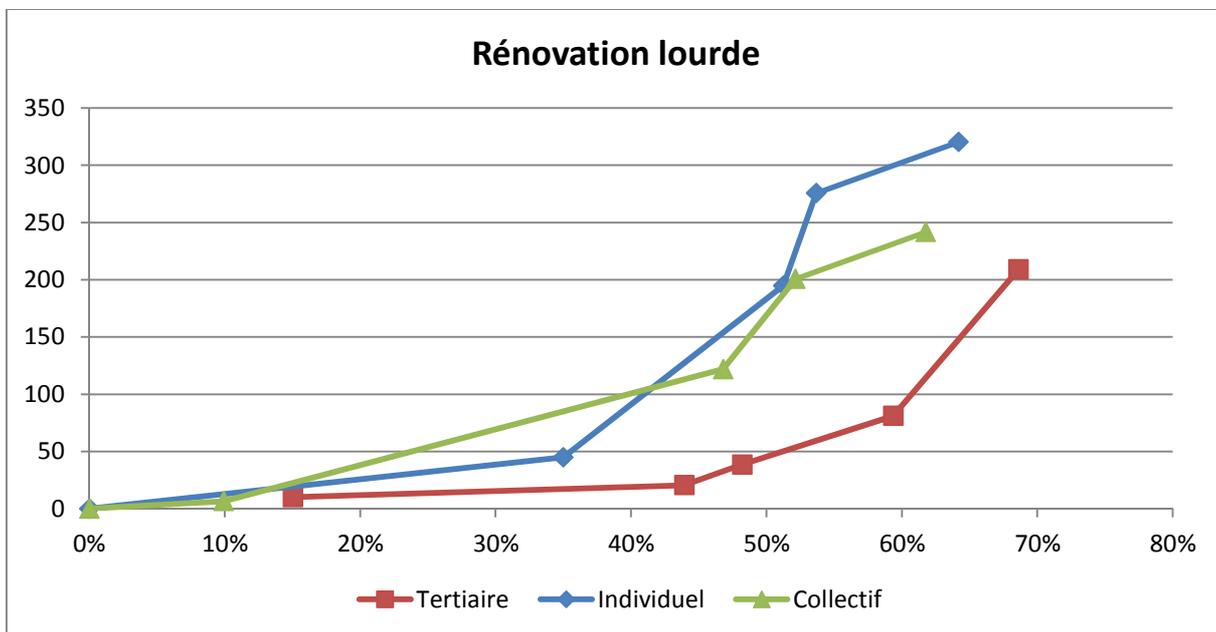
	REF	SOB	ELE	DIV
Rénovation lourde	50 %	60 %	50 %	50 %
Rénovation légère	15 %	15 %	15 %	15 %

*Note : pour le tertiaire, les gains associés aux rénovations lourdes sont supposés moindres (50% en **REF**, **ELE** et **DIV** et 60% en **SOB**), car le niveau de consommation initial est plus élevé en tertiaire ; les rénovations lourdes conduisent donc à des performances à peu près comparables en résidentiel et en tertiaire.*

Les coûts unitaires de rénovation thermique sont fonction du niveau de réduction de consommation envisagé. Trois courbes d'offres de réduction de consommation ont été construites à partir d'opérations élémentaires d'efficacité énergétique (UFE, 2012) pour la maison individuelle et le logement collectif et pour le tertiaire. La courbe du tertiaire est sensiblement en dessous des deux autres ; au-delà des biais statistiques qui pourraient venir d'un nombre moins important d'opérations dans le tertiaire, ce niveau de coût peut s'expliquer par :

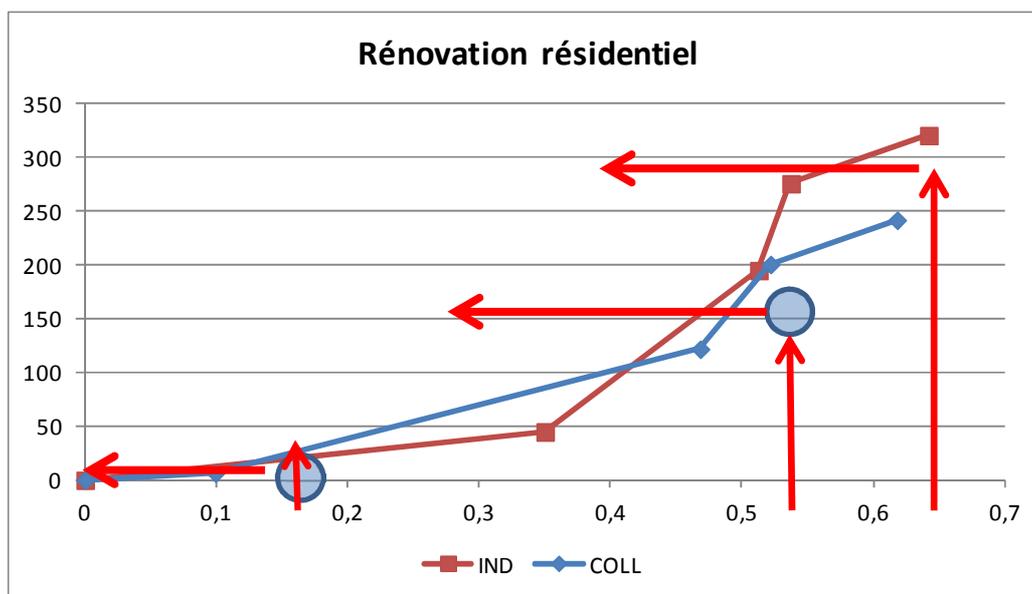
- (i) l'absence de TVA pour les acteurs du tertiaire ;
- (ii) des effets d'échelle plus importants ;
- (iii) et une maîtrise d'ouvrage professionnelle, au moins pour une partie du parc.

### Courbes d'offre de réduction de consommation



Suivant l'objectif de gain d'efficacité énergétique poursuivi, on obtient ainsi une estimation du coût unitaire de rénovation (ex. ci-dessous : 300 €/m<sup>2</sup> pour une rénovation lourde dans le résidentiel permettant d'atteindre 60% de réduction de consommation par rapport à la situation initiale)

### Coût des rénovations légères et lourdes dans le résidentiel



Les besoins d'investissement qui en découlent sont de l'ordre de 900 Md€ (750 pour le résidentiel et 150 pour le tertiaire) sur l'ensemble de la période (2010-50) pour le scénario **SOB** (en différentiel par rapport au scénario de référence) pour lequel le volume de rénovation (on rénove la totalité du parc existant en rénovation lourde) et le niveau de performance requis sont les plus élevés.



En moyenne annuelle, les besoins en investissement seraient donc de l'ordre de 4 Mds€ dans le scénario de référence (tendancier), 12 Mds€ dans **ELE** et **DIV** et plus de 24 Mds€ dans **SOB**.

*Investissements en rénovation énergétique dans le logement, selon les scénarios et par période*

R&T	2014-19	2020-29	2030-49	Moyenne	Cumulé
Durée de la période	6 ans	10 ans	20 ans		36 ans
	M€ <sub>2012</sub>	M€ <sub>2012</sub>	M€ <sub>2012</sub>	M€ <sub>2012</sub> /an	M€ <sub>2012</sub>
REF	26 545	39 627	88 096	4 290	158 735
SOB	155 220	235 862	474 857	24 040	889 479
ELE	67 526	105 168	274 821	12 399	458 745
DIV	65 807	105 674	279 367	12 490	462 132

Ces montants d'investissement peuvent être rapprochés des dépenses d'entretien-amélioration déjà consenties annuellement, à la fois par les ménages et les bailleurs sociaux : 40 Mds€/an pour un parc total d'environ 3 Mds m<sup>2</sup> (yc. vacant et secondaire) et par les acteurs du tertiaire : 30 Mds€/an pour un peu moins de 1 Mds m<sup>2</sup>. Seule une part de ces dépenses a un impact sur l'efficacité énergétique ; l'enquête OPEN estime entre 12 et 15 Mds€ les investissements ayant un impact énergétique sur le périmètre du logement privé ; les dépenses de finition associées à ces investissements seraient d'après l'enquête de l'ordre de 30% des investissements énergétiques.

**Si ce premier chiffrage estime les besoins d'investissement en rénovation associés à chacun des scénarios, il ne permet pas de savoir si les objectifs de rénovation envisagés sont ou non coût-efficaces.** Pour cela, on introduit une différenciation supplémentaire dans la typologie utilisée pour tenir compte de l'âge des bâtiments et donc de leur consommation avant rénovation. Les résultats présentés précédemment montrent (avec un taux d'actualisation de 4%) des écarts de performances assez nets selon le type de logement :

Pour la maison individuelle d'avant 1975, l'optimum de rénovation (maximisation de la VAN – valeur actuelle nette, indicateur de rentabilité d'un investissement) correspond à une amélioration de l'efficacité énergétique de 20% (le temps de retour se situe alors entre 3 et 4 ans) ; avec une amélioration de 45% (relativement proche des 50% retenus dans les scénarios **REF**, **ELE** et **DIV**) la VAN est nulle, c'est – à dire que le temps de retour de l'investissement est proche de la durée de vie envisagée ici soit 25 ans.

Pour la maison individuelle postérieure à 1975, l'optimum de rénovation correspond également à un objectif d'amélioration de l'efficacité de 20% mais le temps de retour est alors de 9 ans ; l'objectif qui annule la VAN est cette fois proche de 40% (temps de retour 28 ans)

Pour le logement collectif d'avant 1975, l'optimum est également proche de 20% (temps de retour de 9 ans) ; la VAN est nulle pour un gain de 45% (temps de retour de 25 ans)

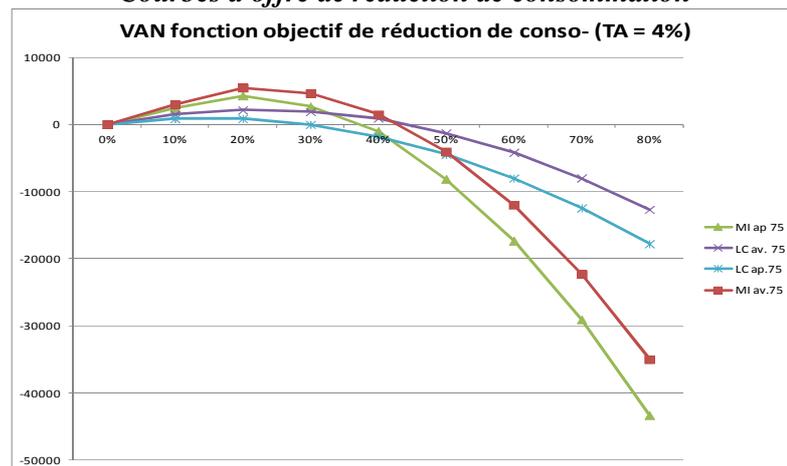
Pour le logement collectif d'après 1975, l'optimum est proche de 20% (le temps de retour est alors voisin de 14 à 15 ans) ; la VAN est nulle pour un gain de 30% (temps de retour de 25 ans)

### Consommations du parc de logements (E Finale)

		Consommation unitaire	Surfaces	Consommation totale
		kWh/m <sup>2</sup>	Mm <sup>2</sup>	TWh
Avant 1974	Individuel	173	900	156
	Collectif	160	463	74
Après 1974	Individuel	136	858	116
	Collectif	105	310	33

Les calculs qui précèdent sont réalisés avec un prix moyen de l'énergie de chauffage de 9 c€/kWh (correspondant au mix énergétique de 2010) et une dérive de 2%/an (en revanche, nous n'avons pas introduit de valeur carbone). Ces résultats sont obtenus avec un taux d'actualisation de 4% traduisant une faible préférence pour le présent correspondant au comportement d'investissement d'un acteur public. Avec un taux d'actualisation de 20% plus proche des taux implicites retenus par les ménages, le temps de retour pour un gain de 20% est voisin de 7 ans, et très supérieur à 25 ans pour un gain de 45%.

### Courbes d'offre de réduction de consommation



Le tableau précédent indique les taux de rendement interne correspondant à chaque classe de bâtiment pour différents objectifs de réduction des consommations d'énergie. Avec les hypothèses retenues, on distingue clairement plusieurs catégories de travaux du point de vue de la performance économique.

Pour des objectifs d'économie d'énergie faibles (moins de 20%), les travaux de rénovation présentent un TRI supérieur à 10%, susceptible d'inciter les ménages à réaliser naturellement ces investissements, à la condition de lever les barrières à l'investissement classiques (asymétrie d'information, garantie de performance, incertitude sur l'évolution du prix des énergies, etc.)

En revanche, pour des objectifs plus ambitieux (au-delà de 20-30%), la rentabilité économique des travaux de rénovation se dégrade sensiblement ; compte tenu du prix actuel des énergies, seuls les logements antérieurs à 1974 peuvent faire l'objet de rénovations lourdes (40%) dans des conditions économiques acceptables pour la puissance publique. Pour inciter les ménages à faire ces investissements dans ces conditions, des incitations publiques puissantes (subventions ou tarification du carbone) apparaissent nécessaires. Les conditions actuelles de réalisation des travaux d'efficacité énergétique grâce au CIDD peuvent donner une idée de l'effort à fournir



### *Taux de rendement interne (TRI) des opérations de rénovation*

Gain énergétique	Indiv < 1974	Indiv > 1974	Coll < 1974	Coll > 1974
10%	31	25	30	20
20%	32	26	14	8
30%	10	8	8	4
40%	5	3	5	2
50%	2	Nd	2	nd

En réalité, d'autres paramètres d'hétérogénéité que l'année de construction mériteraient d'être examinés en détail. En particulier, l'énergie de chauffage est très discriminante dans la facture énergétique initiale des ménages et donc la rentabilité associée à une opération de rénovation lourde. La zone climatique est également très discriminante.

En conclusion, et avec les hypothèses considérées ici pour les coûts de la rénovation, un objectif de 50% de gain sur la rénovation énergétique des bâtiments (individuel ou collectif) antérieurs à 1974 serait proche du coût-efficacité. L'objectif de 60% retenu pour les scénarios **ELE** et **DIV** suppose que des gains d'apprentissage pourront être enregistrés sur les coûts de rénovation modifiant ainsi le niveau d'objectif correspondant à l'optimum économique (à moduler selon l'énergie de chauffage). Avec les hypothèses de coûts actuels, les objectifs de rénovation lourde fixés dans le scénario **SOB** à 70% se situent au-delà de l'objectif coût efficace si on ne considère que les seuls gains directs associés à la rénovation thermique (temps de retour bruts voisins de 40 ans dans ces mêmes bâtiments).

Pour les logements plus récents en revanche, des objectifs de 40% et 30% de rénovation dans l'individuel et le collectif respectivement seraient plus proches des objectifs coût-efficaces.

Les objectifs de rénovation légère fixés à 15% sont eux très proches de l'optimum (maximisation de la VAN) dans tous les cas.

**La prise en compte des barrières à l'investissement (asymétrie d'information, garantie de performance, incertitude sur l'évolution du prix des énergies, etc.) dégrade fortement le potentiel accessible avec une rentabilité économique incitative pour les ménages.**



## Annexe 4 : La valeur du carbone dans les scénarios de l'ANCRE

Les scénarios élaborés par (le GP9 de) l'ANCRE supposent tous la prise en compte d'une valeur du carbone, comme traduisant la nécessité de respecter les engagements de la France et de l'Europe en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La définition-même et le calcul de cette valeur du carbone peuvent découler de deux approches qui ne sont pas nécessairement contradictoires mais procèdent néanmoins de deux logiques très différentes :

- L'approche dite du **coût social du carbone** (*social cost of carbon* tel que défini en particulier aux Etats-Unis) vise à introduire de manière continue et générale dans l'économie le coût actualisé des externalités induites par les émissions de gaz à effet de serre ; on se situe ici dans une **approche coût-avantage**, dans laquelle le coût marginal de réduction doit en permanence être égal au coût marginal social des dommages évités.

### Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis, Interagency Working Group on SCC, US Gov., May 2013

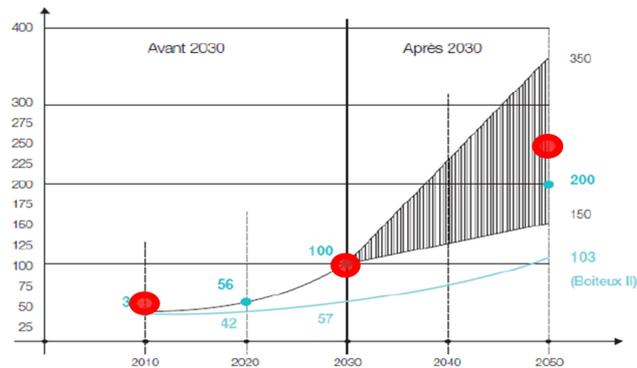
#### Revised Social Cost of CO<sub>2</sub>, 2010 – 2050 (in 2007 dollars per metric ton of CO<sub>2</sub>)

Discount Rate	5.0%	3.0%	2.5%	3.0%
Year	Avg	Avg	Avg	95th
2010	11	33	52	90
2015	12	38	58	109
2020	12	43	65	129
2025	14	48	70	144
2030	16	52	76	159
2035	19	57	81	176
2040	21	62	87	192
2045	24	66	92	206
2050	27	71	98	221

-L'approche dite de la **valeur tutélaire du carbone** (VTC) a été développée en France, notamment à partir des premiers travaux de M. Boiteux pour le Commissariat Général au Plan, puis de ceux de la commission animée par A. Quinet en 2008 et en 2013 ; on est ici plutôt dans une **approche coût-efficacité** dans laquelle la valeur du carbone est estimée comme la valeur-prix duale de la contrainte quantitative d'émission ; pour la France cette contrainte découle des objectifs

- i. du Protocole de Kyoto (stabilisation en 2010/1990) ;
- ii. du paquet climat-énergie européen pour 2020 (20% de réduction des émissions, toujours par rapport à 1990) ;
- iii. enfin de l'objectif "Facteur 4" réduction de 75% pour 2050, inscrit dans la loi POPE de 2005.

### Valeur Tutélaire du Carbone pour la France, Commission Quinet I (2008) et II (2013, en rouge)



Source : Centre d'analyse stratégique

Dans le premier rapport présenté par A. Quinet, la valeur de 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030 apparaissait –après prise en compte des résultats de scénarios développés avec plusieurs modèles – comme une valeur de consensus entre les experts, l'administration et les différentes partie-prenantes.

Dans le deuxième rapport de 2013 cette valeur n'est pas remise en cause, mais l'application d'une règle de Hotelling pour la croissance de la VTC, combinée à la révision du taux d'actualisation (passant de 4%/an à 4,5%/an, soit 2,5% de taux sans risque + 2xbêta, avec bêta un coefficient de risque égal à 1) conduit à recalculer des valeurs plus élevées pour 2010 (42€) comme pour 2050 (240€). L'évaluation de tous les investissements publics présentant des impacts sur les émissions de gaz à effet de serre devrait donc en théorie incorporer une chronique de prix du carbone de : 42, 100 et 240 €/tCO<sub>2</sub>, respectivement en 2010, 2030 et 2050.

Les travaux de prospective menés dans le cadre de l'ANCRE s'inscrivent dans cette perspective et supposent bien une valeur du carbone, introduite comme une taxation carbone de l'énergie finale ou bien comme un prix des permis pour les industries soumises au Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emission (SCEQE couvrant environ 40% des émissions en France, 50% en Europe). Les hypothèses supposées sont proches de la VTC des rapports Quinet puisque celle-ci est sensée refléter le prix nécessaire pour atteindre, sur le long terme le Facteur 4, qui constitue bien une des contraintes imposée aux scénarios ANCRE. Néanmoins le choix de cette trajectoire pour la valeur du carbone dans les scénarios ANCRE appelle trois remarques :

**Il a été considéré que la valeur du carbone ne devait pas forcément être identique selon les scénarios ;** en particulier, dans le scénario Sobriété (SOB), qui suppose des changements importants dans les comportements des consommateurs d'énergie, le signal que constitue la valeur du carbone devrait être plus élevé que dans les autres scénarios ; ceux-ci font en effet plus appel à des solutions technologiques mises en œuvre dans le secteur énergétique, avec des critères de décision plus strictement économiques ; on devrait alors se situer sur la branche haute de la fourchette proposée par les rapports Quinet.

**Une valeur élevée du carbone ne signifie pas nécessairement un prélèvement sur le pouvoir d'achat des ménages ou une augmentation globale des coûts des entreprises ;** en effet la ressource fiscale supplémentaire que constituerait la fiscalité carbone devrait, dans une hypothèse de neutralité fiscale, être recyclée par exemple via un "chèque vert" pour la part payée par les ménages et via une réduction des cotisations sociales des entreprises pour la part acquittée par celles-ci.



Enfin, la coexistence d'un marché des quotas pour les entreprises fortement émettrices et d'une taxe carbone pour les secteurs d'émissions diffuses (bâtiment et transport) permet d'**envisager une différenciation du signal selon les secteurs, avec éventuellement un prix plus faible pour l'industrie** ; cette différenciation dérogerait aux principes théoriques de l'égalité du signal, mais elle constituerait en revanche une solution pratique satisfaisante, si le signal donné à l'industrie était suffisant pour déclencher les choix technologiques nécessaires sans impacter plus que de besoin la compétitivité des entreprises.

Par ailleurs, il convient de garder à l'esprit que **la valeur de la taxe carbone est une valeur implicite (un « signal-prix équivalent »)** : des mesures législatives ou réglementaires peuvent tout à fait induire un comportement des agents économiques équivalent à celui qu'ils auraient pour un niveau de taxe carbone (au sens fiscal) donné. De la même façon, des incitations financières (crédit d'impôt, etc.) en faveur de produits ou activités moins carbonées peuvent également induire des différentiels de prix similaires à ceux qu'aurait l'instauration d'une taxe carbone.



## Annexe 5 : R&D et chronologie de déploiement des technologies

L'ANCRE travaille actuellement à l'analyse, scénario par scénario et secteur par secteur, du potentiel de déploiement des différentes technologies. Un exemple en est donné ci-après :

Scénario	Produit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ELE	Biocarburants 2G (voie biologique)	2	2	3	3	4	4	4	4	4
ELE	Biocarburants 2G (BtL autho)	2	2	3	3	4	4	4	4	4
ELE	Biocarburants 2G (BtL allo)	1	2	2	3	3	3	3	4	4
ELE	Biocarburants 2G (bioSNG autho)	2	2	3	3	4	4	4	4	4
ELE	Biocarburants 2G (BioSNG allo)	1	2	2	3	3	3	3	4	4
ELE	Biocarburants 3G (biométhane)	1	1	2	2	2	3	3	3	3
ELE	Méthanisation	4	4	5	5	5	5	5	5	5
ELE	Combustion (biomasse)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ELE	Cogénération (biomasse)	4	4	5	5	5	5	5	5	5
SOB	Biocarburants 2G (voie biologique)	2	2	3	3	3	4	4	4	4
SOB	Biocarburants 2G (BtL autho)	2	2	3	3	3	4	4	4	4
SOB	Biocarburants 2G (BtL allo)	1	2	2	3	3	3	3	4	4
SOB	Biocarburants 2G (bioSNG autho)	2	2	3	3	3	4	4	4	4
SOB	Biocarburants 2G (BioSNG allo)	1	2	2	3	3	3	3	4	4
SOB	Biocarburants 3G (biométhane)	1	1	1	2	2	2	3	3	3
SOB	Méthanisation	4	4	5	5	5	5	5	5	5
SOB	Combustion (biomasse)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SOB	Cogénération (biomasse)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DIV	Biocarburants 2G (voie biologique)	2	3	3	4	5	5	5	5	5
DIV	Biocarburants 2G (BtL autho)	2	3	3	4	5	5	5	5	5
DIV	Biocarburants 2G (BtL allo)	1	2	2	3	3	4	4	5	5
DIV	Biocarburants 2G (bioSNG autho)	2	3	3	4	5	5	5	5	5
DIV	Biocarburants 2G (BioSNG allo)	1	2	2	3	3	4	4	5	5
DIV	Biocarburants 3G (biométhane)	1	1	2	2	3	3	4	5	5
DIV	Méthanisation	4	4	5	5	5	5	5	5	5
DIV	Combustion (biomasse)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
DIV	Cogénération (biomasse)	4	4	4	4	5	5	5	5	5

0=pas de R&D ni de déploiement / 5=déploiement à grande échelle



## Annexe 6 : Liste des contributeurs

Le groupe de travail des « scénaristes » a été coordonné par Nathalie ALAZARD-TOUX (IFPEN), Patrick CRIQUI (UPMF/EDDEN) et Jean-Guy DEVEZEAUX de LAVERGNE (CEA). Sa composition est la suivante :

Sophie AVRIL - CEA  
Christian CAVATA – CEA  
Nicolas DES COURTILS – IPFEN  
Emmanuel HACHE – IPFEN  
Alain LE DUIGOU – CEA  
Elisabeth LE NET – CEA  
Alban LIEGEARD – IPFEN  
Daphné LORNE - IPFEN  
Jeanne MARCUCCI-DEMEURE – CEA  
Sandrine MATHY – UPMF.EDDEN  
Philippe MENANTEAU –UPMF/EDDEN  
Henri SAFA – CEA  
Olivier TEISSIER - CSTB  
Benjamin TOPPER – CEA  
Françoise TOUBOUL – CEA

Par ailleurs, l'ensemble de l'Alliance a été largement mobilisé. Figurent ci-après les noms de principaux contributeurs des Groupes Programmatiques (animateurs et co-animateurs 2012-2013), qui ont collaborés aux scénarios présentés ici :

GP 1            Paul COLONNA - INRA  
                  Jack LEGRAND – CPU/CNRS – Université de Nantes  
                  Jean-Luc DUPLAN – IPFEN  
                  Elisabeth LE NET – FSBT puis CEA

GP2            François KALAYDJIAN – IPFEN  
                  Olivier VIDAL - CPU  
                  Bruno GOFFE - CNRS

GP 3            Franck. CARRE – CEA  
                  Alex MUELLER – CNRS  
                  Henri SAFA – CEA

GP4            Jean-Pierre JOLY – CEA  
                  Gilles FLAMANT – CNRS

GP5            Lionel LEMOINE – IFREMER  
                  Eric HEINTZE –IPFEN  
                  Jean-Luc ACHARD – CNRS/CPU



- GP6            Guillaume USTER - IFSTTAR  
Richard TILAGONE - IFPEN  
Paul LUCCHESE – CEA puis FUTURIS  
Jean DELSEY – IFSTTAR  
Stéphane. HENRIOT – IFPEN
- GP7            Hervé CHARRUE - CSTB  
Françoise CHARBIT – CEA  
Francis ALLARD CNRS
- GP8            Jean-Michel MOST - CNRS  
Lounes TADRIST – Polytech'Marseille  
Laurent FORTI - IFPEN
- GP9            Nicole MERMILLIOD - CEA  
Pascal BARTHELEMY - IPFEN  
Pierre MATARASSO – CNRS  
Nathalie ALAZARD-TOUX - IFPEN  
Patrick CRIQUI – UPMF/EDDEN  
Jean-Guy DEVEZEAUX de LAVERGNE – CEA  
Elisabeth MERLEN - IFPEN
- GP10           Nicole MERMILLIOD - CEA  
Nouredine HADJSAID - INPG  
Pascal BRAULT - CNRS