

## Les scénarios de transition énergétique de l'ANCRE

ANCRE<sup>1</sup>

***Alors que le Parlement doit débattre de la Loi de programmation de la transition énergétique (LPTE), les organismes publics de recherche – regroupés dans l'ANCRE – présentent leurs scénarios pour assurer cette mutation fondamentale pour la France. Comment réduire à 50 % la part du nucléaire dans le mix électrique en 2025 et diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre pour 2050 ? L'ANCRE estime que des investissements considérables seront nécessaires pour développer des nouvelles technologies et construire des réseaux de distribution, ainsi que des changements dans le comportement des consommateurs.***

Les scénarios énergétiques de l'ANCRE (Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie) ont été définis par divers éléments de cadrage : un objectif de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, l'engagement gouvernemental d'une réduction à 50 % de la part de l'énergie nucléaire dans le mix électrique à l'horizon 2025, une évolution du mix électrique intégrant davantage d'énergies renouvelables et un effort d'efficacité énergétique. Les « trajectoires » proposées partent d'une analyse des déterminants de la demande – globale et par secteur – et de l'offre énergétique, 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.

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 dans les comportements des consommateurs, ménages et entreprises, par le développement d'une offre énergétique largement décarbonée, et par une gestion ré-optimisée des réseaux et des vecteurs énergétiques. Dans cet esprit, l'ANCRE a défini trois scénarios principaux et deux scénarios alternatifs, décrivant des visions contrastées de l'avenir énergétique de la France à l'horizon 2050. Pour chaque scénario, sont également identifiées les ruptures technologiques nécessaires au respect des objectifs de réduction des émissions par au moins un facteur 4 dans le secteur énergétique en 2050.

---

1. Article rédigé par Nathalie Alazard-Toux (IFP Energies nouvelles), Patrick Criqui (UPMF-CNRS, EDDEN), Jean-Guy Devezeaux de Lavergne (CEA I-tésé), Emmanuel Hache (IFP Energies nouvelles), Elisabeth Le Net (CEA I-tésé), Daphné Lorne (IFP Energies nouvelles), Sandrine Mathy (UPMF-CNRS, EDDEN), Philippe Menanteau (UPMF-CNRS, EDDEN), Henri Safa (CEA I-tésé), Olivier Teissier (CSTB), Benjamin Topper (CEA I-tésé).

## 1. Description des scénarios et de la méthodologie retenue

### A) Trois scénarios structurels

#### *Le scénario « sobriété renforcée » (SOB)*

La trajectoire proposée dans ce scénario repose sur trois leviers : des comportements de consommation énergétique vertueux et « sobres » ; un effort renforcé en termes d'efficacité énergétique, avec notamment des investissements importants pour la rénovation des bâtiments existants ; un développement important des énergies renouvelables variables (EnR).

Les hypothèses du scénario SOB sur les modifications de comportement des consommateurs concernent le secteur des transports, avec une évolution à la baisse de la mobilité et du taux de motorisation individuels, le développement de modes de déplacements doux, du covoiturage, de l'auto-partage, etc. Elles s'appliquent également dans le secteur du bâtiment avec une moindre croissance des surfaces par personne, une proportion plus importante de logements collectifs. Le scénario suppose aussi une absence d'effets- rebond – bien que ceux-ci soient généralement observés après un processus de rénovation – ainsi qu'une stabilisation puis une décroissance des consommations d'électricité spécifiques.

Ces évolutions de comportement résultent notamment (mais pas uniquement) de la mise en place de dispositifs incitatifs appropriés (signaux tarifaires) ou réglementaires. En termes de rupture technologique, ce scénario fait appel au développement de solutions d'effacement de la demande électrique pour gérer la variabilité des sources renouvelables et au développement de la capture et du stockage de CO<sub>2</sub> dans le secteur électrique et certaines grandes industries.

#### *Le scénario « décarbonation par l'électricité » (ELE)*

Cette trajectoire met en avant le vecteur électrique et l'efficacité énergétique pour répondre aux objectifs de la transition énergétique. La décarbonation repose dans ce scénario sur le développement d'une électricité

fortement décarbonée, d'origine renouvelable ou nucléaire, et la pénétration progressive de l'électricité sur de nouveaux usages sectoriels (transports automobiles, industrie, production d'hydrogène, etc.). Ce scénario repose également sur une rupture technologique avec l'hypothèse d'un développement massif du stockage d'électricité en mode inter-saisonnier (jusqu'à 38GW et 47 TWh), de façon à permettre la pleine utilisation de l'énergie produite par les EnR.

#### *Le scénario « vecteurs diversifiés » (DIV)*

La trajectoire proposée dans le scénario DIV repose sur la diversification des vecteurs au sein du système énergétique (électricité, chaleur, gaz, liquides) : en valorisant des sources de chaleur fatale (récupération de chaleur basse-température, chaleur des centrales électriques et sources renouvelables) ; en développant de manière importante les bioénergies, notamment les carburants sous forme liquide ou gazeuse ; et en mettant à nouveau en avant l'efficacité énergétique. La récupération de la chaleur des centrales nucléaires (80 TWh vers le résidentiel-tertiaire et 40 TWh vers l'industrie) est un élément important de ce scénario. Le potentiel théorique de valorisation de la chaleur nucléaire est très important en France, étant donné la puissance du parc nucléaire installé ; pour autant, ce gisement est pour l'instant totalement inexploité.

### B) Les scénarios complémentaires

#### *La variante « nucléaire et ENR » (ELEC-V)*

Ce 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 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 supérieure à 50 % en 2025 et au-delà. Une part de cogénération nucléaire est également intégrée dans ce scénario. Un espace suffisant est néanmoins

créé pour un développement significatif des EnR variables, compatible avec les objectifs européens dans ce domaine.

*Le scénario de référence « tendancielle » (TEND)*

Une trajectoire « de référence » a également été construite, essentiellement à des fins de comparaison et d'évaluation. Elle permet d'illustrer ce que serait la dynamique du système énergétique français si l'on prolongeait les tendances actuellement observées, en tenant compte des engagements gouvernementaux sur les politiques « énergie et climat ». Cette trajectoire n'est cependant pas « à parc constant » puisqu'elle prend en compte les dynamiques récentes, par exemple en termes de rythme d'installation des EnR.

**C) Méthodologie**

Les travaux de l'ANCRE ont été réalisés selon un processus combinant : une analyse puis une agrégation des évolutions des besoins énergétiques des différents secteurs ; une estimation des impacts de ces évolutions sur le secteur de l'énergie (production d'électricité, raffinage de pétrole, transport et distribution de gaz et de chaleur) ; enfin une caractérisation de l'évolution du mix énergétique. Le cadre global reste le même pour tous les scénarios : un

accroissement de la population de 15 % d'ici 2050 et une croissance économique qui augmente de 1,7 %/an en moyenne sur la période,

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. Davantage que toute autre industrie, le secteur de l'énergie se caractérise par des constantes de temps très longues.

L'évolution de la demande globale apparaît en rupture avec la tendance historique d'augmentation continue de la consommation énergétique par habitant. Cette inflexion rend compte à la fois d'un processus de saturation que l'on peut déjà noter, mais aussi de changements nécessaires pour la réduction de la consommation de ressources épuisables et des impacts des activités énergétiques sur l'environnement, global et local. Tous les scénarios misent sur un renforcement plus ou moins poussé de la sobriété énergétique, de l'utilisation rationnelle de l'énergie et de l'efficacité à la production comme à la consommation. Le tableau 1 illustre la nature des évolutions sociétales sous-jacentes aux différents scénarios. De ce point de vue, le scénario SOB se différencie fortement des autres avec, en 2050,

<b>Tableau 1</b>							
<b>Évolution des modes de vie selon les scénarios</b>							
Source : ANCRE							
	<b>2010</b>	<b>2030</b>			<b>2050</b>		
<b>Population (millions d'habitants)</b>	<b>62,8</b>	<b>68,5</b>			<b>72,3</b>		
Scénario		<b>TEND</b>	<b>ELE / DIV</b>	<b>SOB</b>	<b>TEND</b>	<b>ELE / DIV</b>	<b>SOB</b>
<b>Habitat</b>							
Mm <sup>2</sup>	2 539	3 063	3 063	2 957	3 559	3 559	3 377
m <sup>2</sup> /hab	40	45	45	43	49	49	47
Part de l'habitat collectif (% logements)	43 %	44 %	44 %	46 %	45 %	45 %	49 %
<b>Tertiaire</b>							
m <sup>2</sup> /emploi	52	55	55	52	55	55	52
<b>Mobilité</b>							
Trafic passager (hors aérien) Gpkm	971	1 088	1 088	980	1 219	1 219	976
Parc de véhicules particuliers (millions de véhicules)	31	37	36	32	43	39	17

une mobilité plus faible de 20 % par rapport au scénario tendanciel, ce qui, combiné aux changements dans les modes d'usage, entraîne un parc de véhicules particuliers diminué de près de 60 %.

Si l'essentiel des travaux de l'ANCRE s'est focalisé sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie, une évaluation du positionnement global des scénarios de l'ANCRE dans un objectif de réduction de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre a été réalisé<sup>2</sup>.

## 2. Les résultats des scénarios

L'analyse comparative des trois scénarios structurels permet de comparer différentes voies qui permettent d'atteindre le facteur 4 pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050. Deux résultats principaux ressortent de cette évaluation qui n'en est encore qu'à ses débuts :

- Les trois scénarios permettent d'atteindre le facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> énergétique. Pour cela, il faut actionner plusieurs leviers, dont des évolutions marquées des comportements des ménages et des industries et un investissement important pour les options d'efficacité, de renouvelables et

les infrastructures énergétiques. Issus des analyses des experts des différents organismes de recherche rassemblés dans les dix groupes de travail de l'Alliance, ces scénarios reconnaissent néanmoins le rôle central de la technologie. Ainsi, ils identifient des ruptures technologiques qui, par nature, ne sont pas acquises (tableau 2).

- Les scénarios permettent de décrire des trajectoires débouchant sur une baisse de 65 à 70 % de la totalité des émissions de GES (tous secteurs confondus). L'atteinte du facteur 4 tous GES supposerait de nouvelles ruptures technologiques.

### A) Bilan en consommation d'énergie primaire

Dans le scénario de référence TEND, 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 des consommations, notamment la démographie et la croissance économique.

La consommation primaire est fortement réduite par rapport à 2010 dans le scénario SOB (-32 %), alors qu'une différenciation assez nette apparaît au niveau de l'énergie primaire entre cette fois le scénario DIV et les scénarios ELE et ELEC-V. En effet, alors que ces deux derniers scénarios s'appuient plutôt sur le vecteur électrique, le scénario diversifié suppose un important développement des vecteurs issus de la biomasse. La transition énergétique est donc obtenue, selon les scénarios, par un mix différent des trois leviers principaux : réduction de la demande, décarbonation de l'électricité, décarbonation par les bioénergies.

### B) Bilan en consommation d'énergie finale<sup>3</sup>

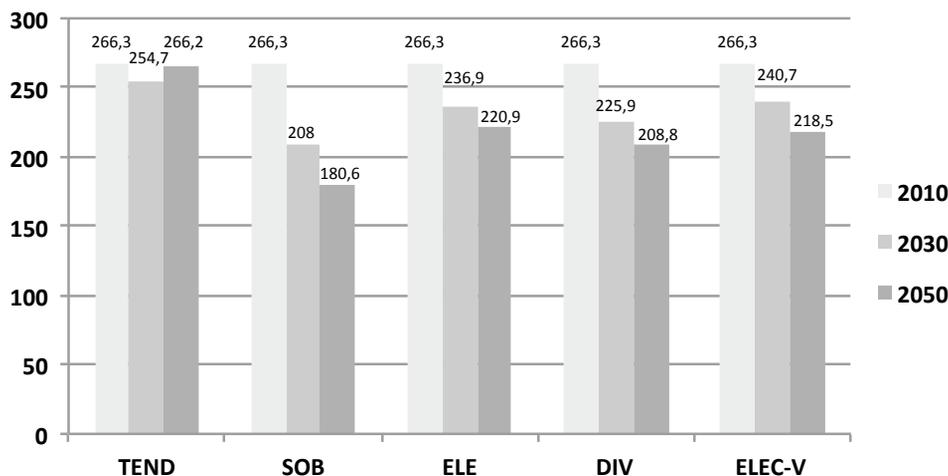
Le scénario SOB se distingue nettement des autres scénarios en matière de consommation d'énergie finale, avec une baisse significative

Tableau 2	
Ruptures technologiques	
Source : ANCRE	
Scénario	Type de technologies de rupture
SOB	Captage, recyclage et stockage du CO <sub>2</sub> (jusqu'à 40 MtCO <sub>2</sub> en 2050) Réseaux intelligents
ELE*	Stockage électrique de grande capacité (38 GWe-47 TWh)
DIV	Cogénération, notamment nucléaire (jusqu'à 80 TWh vers le résidentiel tertiaire et 40 TWh vers l'industrie en 2050)

\* Le rapport de l'ANCRE souligne en outre que, dans le scénario ELE, le niveau très élevé de stockage qui a été identifié ne pourrait être satisfait par les technologies identifiées à ce jour.

2. Pour une description des enjeux de périmètres, voir « Évaluation des émissions de gaz à effet de serre dans les scénarios énergétiques de l'ANCRE », Elisabeth Le Net, Benjamin Topper, *La Lettre de l'Î-tésé*, décembre 2013.

3. 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 20 Mtep à la consommation finale d'énergie. Ce format « standard » permet une meilleure comparaison entre les scénarios de l'ANCRE et les autres scénarios proposés lors du Débat national sur la transition énergétique.



**Figure 1. Consommation d'énergie primaire 2010-2050\* (en Mtep)** - Source : ANCRE

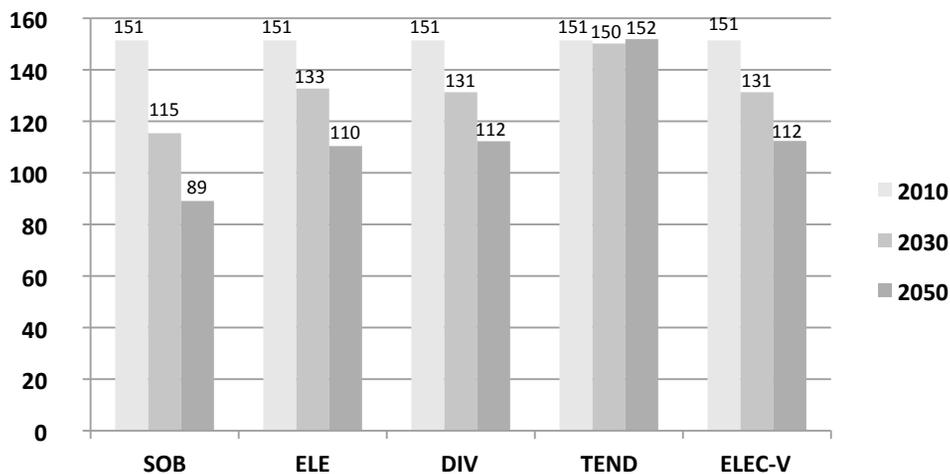
\* Les calculs pour l'énergie primaire incluent les consommations à usages non énergétiques ainsi que les transports internationaux.

par rapport au scénario TEND, de plus de 41 % en 2050. Les scénarios ELE, DIV et ELEC-V enregistrent, pour leur part, une rupture de tendance moins affirmée avec une demande d'énergie finale de l'ordre de 110-112 Mtep en 2050. Cette réduction de 27 % traduit déjà néanmoins un effort considérable de maîtrise de la demande.

Ainsi, les scénarios de l'ANCRE se positionnent-ils parmi ceux qui supposent une baisse significative de l'énergie finale, mais sans toutefois déboucher sur la réduction de moitié de la consommation. Ce débat a été très présent au sein du Débat national sur la transition énergétique (DNTE), les trajectoires les

plus « sobres » et les plus volontaristes supposant une réduction par deux de l'énergie finale sur la période.

L'étude de l'évolution de la part des différents types d'énergie pour chacun des scénarios fait apparaître des trajectoires communes, notamment quant à une réduction de la part des énergies fossiles dans la consommation énergétique finale. Ainsi, les énergies fossiles ne représentent plus que 40 % pour DIV et ELE, contre 50 % pour SOB à l'horizon 2050. Des évolutions communes apparaissent également pour les énergies renouvelables, avec une hausse de la part de ces dernières pour les trois



**Figure 2. Consommation d'énergie finale 2010-2050 (Mtep)** - Source : ANCRE

scénarios. Le scénario ELE se distingue avec une part de 36 % en 2050 (32 % pour SOB, 34 % pour ELE), contre 11 % en 2010. La part des énergies fossiles se stabilise dans le scénario SOB (19 %), alors qu'elle augmente pour être portée à environ 25 % pour DIV et ELE.

### C) Évolution sectorielle des consommations énergétiques<sup>4</sup>

#### Évolution de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel-tertiaire

Dans 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<sup>5</sup>. Ainsi, 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>/an

dans le tertiaire contre, respectivement, 150 000 logements/an et 10 Mm<sup>2</sup>/an actuellement.

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 est supposée économiser jusqu'à 70 % de l'énergie de chauffage par opération, sans effet-rebond notable.

Les performances du parc neuf sont identiques dans les trois scénarios et répondent à l'introduction de normes thermiques sévères, mais les scénarios se différencient en termes de surfaces construites. Dans le scénario SOB, la proportion de logements collectifs augmente, ce qui se traduit par un ratio de surface par habitant plus faible ; de même dans le tertiaire, les surfaces par emploi sont moins importantes que dans les scénarios DIV et ELE.

Dans le scénario de référence, la réglementation thermique pour les logements neufs et la rénovation progressive du parc existant permettent de stabiliser la consommation totale d'énergie des bâtiments. Elle conserve en 2050 un niveau proche de celui de 2000. Dans les scénarios ELE et DIV, la consommation d'énergie (chauffage, eau chaude et rafraîchissement) diminue nettement du fait de l'accroissement du rythme de rénovation thermique (-30 % par rapport à 2000). Elle décroît plus encore dans le scénario SOB en raison de l'effort massif de

4. L'agriculture n'est pas présentée en détail dans cet article. Ce secteur fait l'objet d'une analyse approfondie dans l'article de Elisabeth Le Net et Benjamin Topper, *La lettre de l'été*, décembre 2013. Le secteur énergétique se déduit des précédents (en ce qui concerne son activité par énergie transformée). Sa structure est fortement modifiée dans tous les scénarios, au bénéfice des énergies renouvelables.  
5. Dans les scénarios ELE et DIV, 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 %.

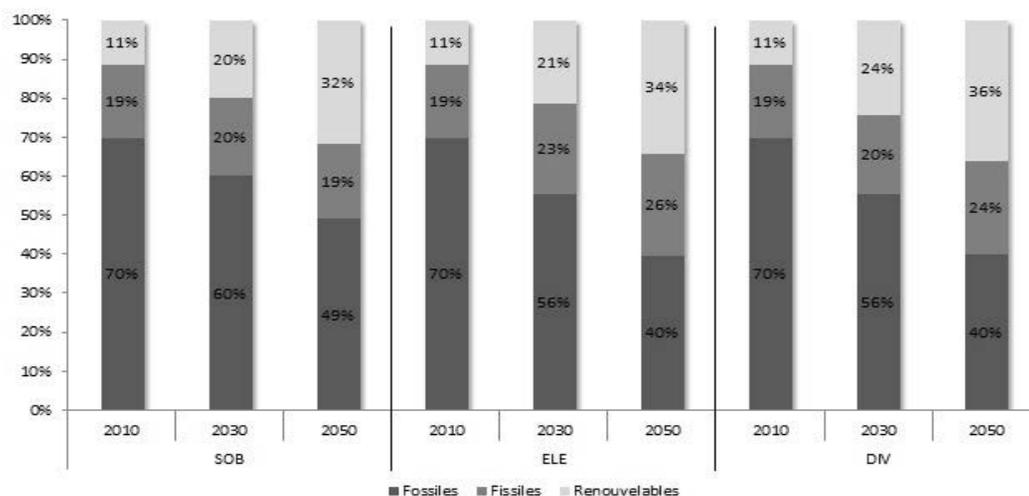
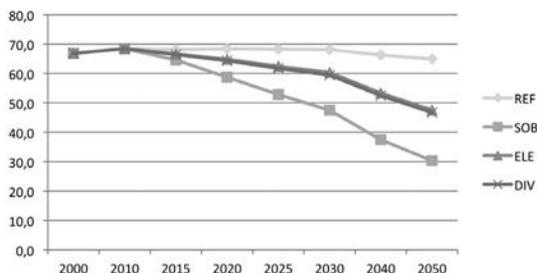


Figure 3. Part des énergies fossiles, fissiles\* et renouvelables dans la consommation énergétique finale (en %) - Source : ANCRE

\*Le fissile inclut la cogénération nucléaire.

rénovation du parc existant (-55 %) par rapport à 2000.



**Figure 4. Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel et tertiaire (Mtep)**

Source : ANCRE

Dans le scénario de référence TEND, la part des différentes sources d'énergie est peu modifiée pour les usages thermiques, avec néanmoins une baisse de la part du fioul. De même, les parts de marché sont assez peu modifiées dans le scénario SOB, qui se traduit cependant par la disparition du fioul, un recul du gaz et une augmentation de la part relative de l'électricité, essentiellement liée aux usages spécifiques. En revanche, les deux scénarios ELE et DIV présentent des mix très différents par rapport au scénario TEND. 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 d'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 co-générée par les centrales électriques ou réseaux indépendants alimentés par des chaleurs de récupération ou issues de la biomasse) et, dans une moindre mesure, au développement des autres sources de chaleur renouvelable (biomasse en usage direct, solaire basse température).

#### *Évolution de la consommation d'énergie dans les transports*

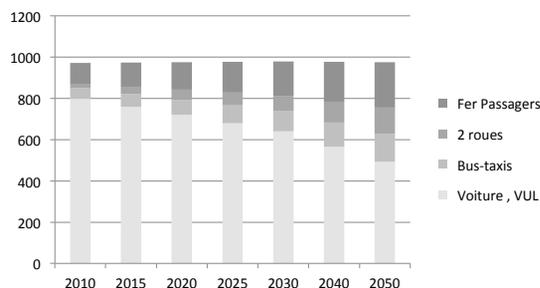
Concernant le secteur transport, les divergences entre les différentes trajectoires proposées par l'ANCRE portent sur l'évolution de la demande de mobilité, la part relative des différents modes de transport et les technologies et vecteurs énergétiques privilégiés.

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), augmente de 25 % entre 2010 et 2050, un accroissement essentiellement lié à l'évolution de la population (plus de 72 millions d'habitants en 2050, soit +15 % par rapport à 2010). Sur cette même période le transport de marchandise, exprimé en tonnes-kilomètre (tkm), augmente de 53 %.

Dans le scénario SOB, l'hypothèse est faite d'une modification forte des comportements et des modes d'organisation. La mobilité par personne diminue de 20 % en moyenne à l'horizon 2050, ce qui conduit à une stabilité du volume global de passagers-kilomètre, malgré l'augmentation de la population et des revenus. Cette diminution est imputable à l'adoption de modes de transport « doux » (vélo, marche) et de nouveaux modes d'organisation (télétravail, rationalisation de l'organisation de la distribution des biens, 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, auto-partage, etc.). Le parc automobile (véhicules particuliers, y compris 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 circuits courts sont privilégiés. La conséquence est un maintien du nombre de tonnes-kilomètre au niveau observé en 2007 (avant la 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, multiplié par 3 par rapport à son niveau actuel, soit un accroissement de 50 % par rapport au niveau le plus haut observé en 2000.



**Figure 5. Évolution des modes de transport dans le scénario SOB (en Gpkm)**

Source : ANCRE

Dans tous les scénarios, les rythmes d'innovation et de diffusion des technologies sont accélérés, avec 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 décennies. Toutes les trajectoires mettent ainsi en évidence une hausse de la part des véhicules électrifiés dans le parc : véhicules électriques (VE) et véhicules hybrides rechargeables (VHR). Elle représente au moins 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.

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.

Les hypothèses de changement sont également de type organisationnel. Dans le scénario SOB, on observe le développement d'une offre de mobilité multimodale et de flottes servicielles adaptées au type de déplacement ainsi qu'une modification de l'aménagement urbain et des infrastructures de transports. Le scénario ELE est caractérisé par le renforcement du réseau électrique et la construction d'infrastructures de recharge allant de pair avec le développement

d'une mobilité électrique poussée. Le scénario DIV voit la structuration d'une importante filière de production de biocarburants de deuxième et de troisième génération.

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, en plus d'un effort d'innovation, fait l'hypothèse d'une forte réduction de la demande de mobilité, conduit à la réduction la plus importante.

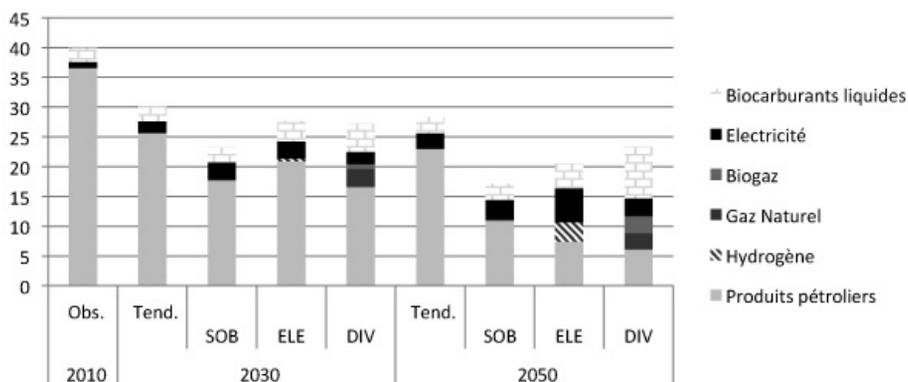
Toutefois, pour l'ensemble des scénarios, les carburants fossiles représentent encore, en 2030, plus de 65 % de l'énergie consommée dans le secteur. Le recul des carburants fossiles par rapport au scénario tendanciel est beaucoup plus marqué à l'horizon 2050. Sur l'ensemble de la période 2010-2050, les volumes de carburants fossiles consommés sont au moins divisés par 3 (SOB), voire par 4 à 5 (DIV et ELE). La part de la biomasse reste modérée dans SOB et ELE, respectivement 15 % et 20 %, mais elle devient très importante pour le scénario DIV, avec 37 % du total. 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.

#### *Évolution de la consommation dans le secteur de l'industrie*

Les scénarios ont été construits sur la base d'une méthode d'analyse factorielle croisant les trois déterminants suivants : un indicateur d'activité de la branche, une intensité énergétique et une clé de répartition des différents vecteurs. Les activités des branches sont les mêmes dans les trois scénarios et leur construction a été calée sur le scénario Enerdata AMS-O pour la DGEC<sup>6</sup>. Ce scénario suppose un taux de croissance économique et un taux de croissance de la production industrielle de 1,7 %/an jusqu'en 2030. Certains ajustements sectoriels ont cependant été effectués, notamment concernant les productions de *clinker* (pour le ciment à usage du bâtiment), de ferrailles et d'aciers<sup>7</sup>.

6. DGEC, 2011, « Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à l'horizon 2030 », synthèse, 26 p.

7. Les productions nationales de ces deux branches suivraient 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



**Figure 6. Consommation finale du secteur transport par type d'énergie (en Mtep hors carburéacteur et soutes internationales) - Source : ANCRE**

La mise en œuvre de nouvelles technologies contribuerait 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 internationaux. Le détail en termes d'intensité énergétique a été construit en distinguant l'intensité électrique et l'intensité en autres vecteurs. *In fine*, la modélisation retenue a été tout d'abord construite pour le scénario SOB avec une analyse branche par branche, puis appliquée aux autres scénarios avec une hypothèse de mobilisation des potentiels légèrement inférieure.

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.

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

La mise en œuvre de la technique de Capture et stockage du carbone (CSC) est supposée possible à partir de 2030. Au total, cette technique serait à même de capturer et stocker jusqu'à 40 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an

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.

en 2050 dans le scénario SOB. Compte-tenu de la faiblesse de la production d'électricité « à flamme », 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. 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 %.

#### *Le rôle de la technologie dans l'efficacité énergétique du secteur industriel*

Pour le scénario SOB, 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 des autres scénarios. À 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 %.

Le scénario ELE est bâti sur une trame proche du scénario précédent. Toutefois, le potentiel de gain en intensité énergétique est supposé moins fort. On suppose qu'une part significative de l'effort vise à profiter des gains d'intensité énergétique rendus possibles en premier lieu par une forte substitution des énergies fossiles par l'électricité puis par les EnR non électriques. Globalement, ce gain est évalué à une

substitution de 3 Mtep en 2030 (et 6 Mtep en 2050), essentiellement par l'électricité. 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.

Le scénario DIV 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 (écologie industrielle) amène toutefois une baisse de la consommation, estimée à 5 % en 2050. La répartition entre électricité et autres énergies reste ici identique à celle du scénario ELE. 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 et compte tenu de la croissance de l'industrie, ce secteur voit 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 structurants 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>.

#### *Évolution de la consommation dans le secteur de l'agriculture*

Dans l'exercice ANCRE, les déterminants de la demande d'énergie de l'agriculture et de la sylviculture sont pris en compte de manière simplifiée, 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 culturelles avec l'identification de dix actions de

réduction des GES, qui restent cependant compatibles avec une production agricole élevée.

L'approche retenue 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 de construction et bois d'œuvre). Un élément-clé 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 et elles sont cohérentes avec l'évolution du potentiel en biomasse disponible, induisant une division par 2 des émissions de GES du secteur à l'horizon 2050.

#### **D) Résultats pour la production d'énergie**

Une fois pris en compte le niveau de consommation d'énergie finale, les scénarios se différencient 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 chaleur perdue sur les centrales thermiques.

#### *La production d'électricité*

La production d'électricité est déjà aujourd'hui à près de 90 % décarbonée (< 65 gCO<sub>2</sub>/kWh)<sup>8</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

8. 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 (édition 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.

soutenu après 2020, avec plus de 100 GWe en éolien et en solaire installés d'ici 2050.

- Élimination 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 de la production d'électricité en 2050 sont reportés sur la figure 7.

#### Puissance électrique installée

À l'horizon 2050, la majorité des énergies renouvelables électriques étant variable, avec des facteurs de charge de l'ordre de 15 à 30 % (respectivement solaire, éolien), la puissance électrique installée devient 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 (*smartgrids*) et, d'autre part, un renforcement des réseaux électriques sur le territoire national et des interconnexions avec nos voisins européens (*supergrids*).

#### 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 cycles combinés gaz, les énergies renouvelables ne produisant pas suffisamment d'électricité, en particulier aux instants de plus forte demande (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, dans DIV, la diversification des sources comble une partie du recul du nucléaire. Dans ELE, c'est le stockage massif d'électricité qui permet de lisser la demande sur l'année (le stockage estival étant restitué en hiver) et ainsi d'éviter le 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 se réduit progressivement pour descendre à 60 % en 2050.

#### 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). 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

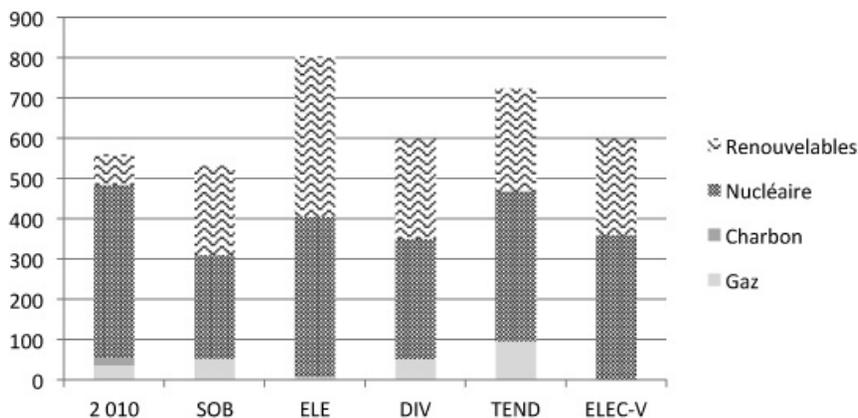


Figure 7. Production électrique par type en 2050 (en Twh) - Source : ANCRE

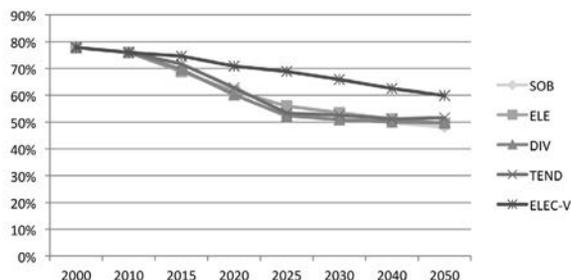


Figure 8. Part du nucléaire dans les différents scénarios

Source : ANCRE

intègrent la cogénération nucléaire. Dans ces deux cas, une partie de la chaleur produite par les centrales 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 basse température.

### E) 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).

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, les scénarios montrent qu'il est impossible de limiter le recours au nucléaire à 50 % de l'énergie électrique en 2025 et de diminuer en même temps les émissions du secteur

électrique<sup>9</sup>. Ce phénomène vient du besoin de *backup* en énergie fossile (gaz) pour pallier à la variabilité des énergies renouvelables installées à la place du nucléaire. À cette date rapprochée, il n'apparaît pas possible de développer des technologies permettant d'éviter cet inconvénient.

### 3. Évaluation économique, sociale et environnementale des scénarios

Le processus du 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 en identifiant un jeu de critères<sup>10</sup> prenant en considération les préoccupations économiques et sociales, environnementales et sociétales, de politique de recherche et d'innovation.

Les efforts dans ce sens, menés soit dans le cadre du DNTE soit dans le cadre des travaux de l'ANCRE, témoignent de l'importance des progrès encore à accomplir pour mettre en œuvre des procédures de mesure rigoureuse des différents impacts des politiques et trajectoires énergétiques. Ce constat donne d'ailleurs des indications sur ce qui pourrait constituer un programme de recherche sur les outils d'évaluation des conséquences sociales, économiques et environnementales des choix de politique énergétique. Les travaux de l'ANCRE adoptent cette démarche, mais ne présentent qu'une approche partielle du problème : ils doivent aujourd'hui, dans bien des cas, se

9. La variante ELEC-V ne respecte pas la contrainte de 50 % de nucléaire en 2025.

10. 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.

limiter à une appréciation qualitative. Compte-tenu de la complexité des questions posées, des incertitudes et du manque de modèle adapté, ce travail devra être poursuivi dans le futur. Les sections suivantes décrivent les principaux critères évalués.

### A) Les trajectoires d'investissement

Au stade actuel, le travail mené par l'ANCRE 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 non la construction neuve de bâtiments (et les éventuels surcoûts dus à la nouvelle réglementation thermique). Dans le secteur des transports au contraire, l'achat d'un véhicule neuf est comptabilisé pour son montant total.

#### *Le secteur du résidentiel tertiaire*

Les simulations de l'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 le type de bâtiment (maison individuelle, logement collectif, tertiaire), la dynamique du parc (destruction, construction neuve), les scénarios de rénovation (volume de rénovation lourde ou légère), les performances thermiques, les évolutions des parts de marché des énergies (chauffage + eau chaude sanitaire – ECS –) et les besoins en investissements de rénovation 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, celui pour lequel le volume de rénovation (la totalité du parc existant fait l'objet d'une 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 TEND, 12 G€ dans ELE et DIV et 24 G€ dans SOB.

**Tableau 3**

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

	2014-19	2020-29	2030-49	Moyenne	Cumulé
	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 : 40 G€/an par les ménages et les bailleurs sociaux, pour un parc total d'environ 3 milliards de m<sup>2</sup> ; 30 G€/an par les acteurs du tertiaire, pour un peu moins de 1 milliard de 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 la même enquête, de l'ordre de 30 % des investissements énergétiques.

Avec les hypothèses<sup>11</sup> considérées pour les coûts de la rénovation, un objectif de 50 % de gain sur la rénovation énergétique des bâtiments antérieurs à 1974 (individuel ou collectif) 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.

Avec les hypothèses de coûts actuels, les objectifs de rénovation lourde fixés dans le scénario SOB à 70 % de réduction des consommations se situent dans la plupart des cas au-delà de l'objectif coût-efficace (ils supposent en effet des temps de retour voisins de 40 ans). Ce calcul devrait être affiné en tenant compte des possibles effets d'apprentissage sur les coûts de

11. Source : Ademe (2012), Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, Campagne 2011.

rénovation et en élargissant le calcul au-delà des seuls gains directs associés à la rénovation thermique considérés ici (préservation de la valeur du parc bâti, notamment). La prise en compte des barrières à l'investissement (asymétries d'information, absence de garantie de performance, incertitude sur l'évolution du prix des énergies, etc.) dégrade encore le potentiel accessible avec une rentabilité économique acceptable pour les ménages et montre le caractère clé des dispositifs d'incitation à mettre en place pour créer une dynamique d'investissement dans la rénovation des bâtiments.

#### *Le secteur du transport*

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

Pour les deux scénarios SOB et ELE, les dépenses 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. 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 ainsi que 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.

Dans le scénario ELE, les dépenses liées à l'achat des véhicules routiers (VP, VUL et PL, hors bus) sont supérieures 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, rappelons que les hypothèses faites en terme de réduction de la mobilité individuelle et de développement massif de solutions de type auto-partage conduisent à une diminution par 2 en 2050 du parc de véhicules, par rapport à son niveau actuel. Dans le scénario ELE, la forte augmentation des dépenses de véhicules est principalement imputable à la diffusion des 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 options. 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 de l'investissement moyen annuel de 11 milliards d'euros, soit une réduction de 11 % entre 2012 et 2050.

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

Dans le scénario ELE, l'investissement dans le secteur électrique est supérieur à celui des autres scénarios, mais il sera partiellement compensé dans un premier temps par un rallongement de la durée d'exploitation ou par un facteur de charge plus élevé des réacteurs nucléaires. Le développement rapide des énergies renouvelables variables, alors qu'elles n'ont pas encore pleinement descendu leur courbe d'apprentissage, constitue 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 de système » significatifs pour le développement-renforcement du système électrique (réseaux intelligents, interconnexions, stockages) et pour les nouveaux outils de gestion de la demande d'électricité (GTB, *smartgrids*...).

Dans le scénario DIV, les investissements de développement des réseaux et de mobilisation de 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 évidemment le scénario demandant le moins d'investissements du côté du système des réseaux.

Les investissements nécessaires pour la production sont calculés<sup>12</sup> selon l'hypothèse d'une

12. 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 : des productions d'électricité par technologie ; des capacités installées par technologies et des coûts des technologies regroupées dans la base de données de coûts tech-

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.

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 en renouvellement, avec une grande partie de ces investissements dédiés à la construction d'EPR. En outre, tous les scénarios considèrent une construction de quelques réacteurs nucléaires de quatrième génération (à neutrons rapides) avant 2050.

## B) Les trajectoires de coût et de prix

### *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.

nologiques (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.

**Tableau 4**

**Dépenses dans le secteur des transports (en G€<sub>2012</sub>) - Source : ANCRE**

Scénario	Dépenses	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	Cumul sur la période 2012-2050	Moyenne annuelle
TEND	Collectif*	16,3	31,6	37,2	47,5	132,7	3,5
	Parc routier**	691,5	834,6	1 043,6	1 214,7	3 784,4	99,6
SOB	Collectif	42,2	79,2	68,3	64,3	254,0	6,7
	Parc routier	490,5	481,3	466,7	423,3	1 861,8	49,0
DIV	Collectif	16,0	30,1	95,2	146,2	287,5	7,6
	Parc routier	722,8	883,6	1 103,2	1 296,0	4 005,7	105,4
ELE / ELEC-V	Collectif	18	30	51	89	188	5
	Parc routier	751	941	1 398	1 789	4 880	128

\* Comprend les infrastructures routes/rail, le parc de transport en commun route, le parc de transport en commun rail, le parc de transport en commun rail, le parc transport de marchandises rail et les installations de production de biocarburants et d'hydrogène.

\*\* Comprend le parc des véhicules privés et utilitaires ainsi que le parc poids lourds de transport de marchandises.

Tableau 5

**Besoins en capacités de production cumulées par décennie  
(sur la période et moyenne annuelle, en GW) et investissements en G€**

Source : ANCRE

	2012-20	2020-30	2030-40	2040-50	2012-50 (en moyenne annuelle)	Investissement en G€
TEND	43	49	70	106	267 (7,0)	589
SOB	48	47	47	98	241 (6,3)	468
ELEC	44	60	72	118	294 (7,7)	606
DIV	52	50	65	94	262 (6 ,9)	491
ELEC-V	39	44	65	87	235 (6,2)	499

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.

*Les coûts de système  
associés à la production d'électricité*

Dans la transition énergétique, la question des coûts systémiques associés à la pénétration des énergies renouvelables variables constitue un problème central dans la détermination des coûts de l'électricité et dans l'évaluation économique des systèmes électriques. Ce problème renvoie 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 déployés 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*) afin d'assurer les capacités de réserve lorsque les ERV ne produisent pas.
2. Les coûts de l'équilibrage offre/demande (*balancing*) qui vont entraîner des montées et descentes en puissance sur des temps courts, avec des pertes d'efficacité et donc des coûts supplémentaires.
3. Les coûts supplémentaires de développement des réseaux, au plan national ou international, 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 : la demande, la production éolienne et la production solaire (photovoltaïque). Cela en tenant compte de la dimension territorialisée des grandes

Tableau 6

**Investissements cumulés par secteur entre 2012 et 2050  
et moyenne annuelle tous secteurs(en G€ 2012) - Source : ANCRE**

	Secteur tertiaire, résidentiel	Transport	Production d'électricité	Investissement annuel (tous secteurs), en G€ 2012
TEND	159	3 917	589	123
SOB	889	2 116	468	92
ELE	459	5 068	606	161
DIV	462	4 293	491	138

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.

#### *Les éléments de coût structurants pour chaque scénario*

Une cause d'incertitude majeure sur les coûts du scénario SOB 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 investissement de rénovation et augmentation des prix, sans doute par des aides ou compensations ciblées pour les catégories de ménages en situation de précarité.

Dans le scénario ELE, les hypothèses concernant le secteur électrique sont volontaristes en termes de pénétration des ERV (Énergies renouvelables variables). Mais elles 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 en 2030 d'environ 50 % supérieur à ce qu'il est aujourd'hui. Cependant, le scénario ELE pourrait conduire à un coût maîtrisé dès lors que les coûts du nucléaire et des énergies renouvelables, ainsi que ceux de systèmes associés, seraient bien maîtrisés et que leur complémentarité serait gérée de manière efficace. Les coûts de stockage et de réseaux intelligents seront aussi à mieux évaluer dans futur.

Le scénario DIV est lui aussi très innovant du fait de la diversité et de l'originalité des systèmes énergétiques locaux qu'il suppose. À ce stade, nous ne disposons pas d'évaluations précises des coûts induits en France par les processus de diversification des énergies, notamment en termes de réseaux de chaleur. Dans ce scénario, 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.

#### *Prix des énergies fossiles à l'importation et prix des carburants*

Le travail de scénarisation mené par l'ANCRE est basé sur l'hypothèse d'une croissance continue du prix international du pétrole. Celui-ci atteint en termes réels 130 \$/b en 2020 et 215 \$/b en 2050, soit 100 €/b en 2020 et 165 €/b en 2050 (en faisant l'hypothèse d'un maintien 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 et de l'OCDE<sup>13</sup>. 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 sur 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 puis croît faiblement, jusqu'à 14 \$/MBtu (36 €/MWh) en 2050.

L'évolution du prix des carburants, est indiquée par rapport à 2010, à TICE constante et hypothèse de taxe carbone comprise (100 €/tCO<sub>2</sub> en 2030, selon le rapport « Valeur tutélaire du carbone » du CAS, puis 240 €/tCO<sub>2</sub> en 2050, sauf dans SOB avec 300 €/t CO<sub>2</sub>). 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.

13. "The future of oil: geology versus technology", FMI, 2012 ; "The price of oil: Will it start rising again ?" Working Paper No. 1031, OCDE, 2012.

Tableau 7

**Prix du gaz et du pétrole à l'horizon 2050 (en € constant 2010)**

Source : ANCRE

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

*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.

**C) Les trajectoires et leurs impacts sur l'emploi**

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 sur un accroissement notable de la population (75 millions en 2050). De

Tableau 8

**Évolution des prix des carburants à l'horizon 2050 - Source : ANCRE**

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

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 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 et de services et 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, 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, mode de financement de la transition énergétique et conséquences de la dette...).

#### *Une évaluation qualitative de l'emploi par la diffusion des technologies*

Les opportunités offertes par les scénarios de transition énergétique sont potentiellement porteuses d'emplois à travers des investissements supplémentaires ou le déploiement de nouvelles technologies 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, éco-parcs, villes intelligentes... L'enjeu principal sera de savoir où seront localisés ces emplois, en particulier ceux liés aux équipements échangeables internationalement (*tradable goods*), dans notre pays, en Europe ou dans le reste du monde.

Concernant le scénario SOB qui suppose un effort considérable pour la réhabilitation énergétique du parc de bâtiments existants, le premier impact est évidemment un impact 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, un effort de recherche adapté doit permettre de disposer dans ce scénario de nouvelles technologies intelligentes et de services exportables qui permettent les trajectoires les plus efficaces (notamment éco-conception, modélisation, gestion de la demande...). Un potentiel de développement important peut apparaître 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. Ce pronostic pourrait également être généralisé et appliqué aux énergies renouvelables, dont le contenu en emplois

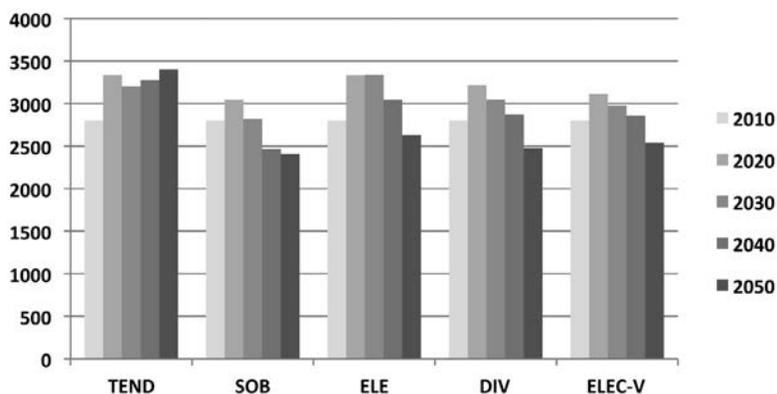


Figure 9. Dépenses énergétiques totales des ménages (€ constants) - Source : ANCRE

sera d'autant plus faible qu'elles seront produites efficacement et que leur coût diminuera.

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 industriels via un maintien de prix compétitif de l'électricité française), mais la possibilité d'un accroissement des exportations d'électricité n'a pas été considérée, malgré les perspectives offertes par une intégration croissante du marché de l'électricité. 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, comme technologie de rupture, présenterait des potentiels d'exportation importants. À 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, pourrait être important.

#### *Un premier chiffrage sectoriel*

L'impact sur l'emploi des scénarios de l'ANCRE a été chiffré sur la base d'un contenu en emplois directs et indirects, rapporté à la production ou aux indicateurs d'activité. Pour les différents secteurs, les résultats doivent toutefois être pris avec beaucoup de précaution, étant donné les incertitudes du chiffrage.

Dans le secteur résidentiel, les créations d'emplois d'ici 2050 s'établiraient à 72 000 pour TEND, contre plus de 400 000 pour SOB. Dans le secteur des transports, elles atteindraient près de 400 000 emplois dans TEND, DIV, ELE et ELEC-V contre une destruction de 168 000 dans SOB. Les impacts pour l'industrie n'ont pas été évalués, mais seraient assez modestes. Les impacts sur l'emploi du secteur énergétique seraient négatifs pour le raffinage dans tous les scénarios. Ils seraient globalement plutôt positifs pour la production d'énergie, compte tenu notamment de l'effort considérable de mutation du secteur, présent dans l'ensemble des scénarios.

Les effets macroéconomiques sont majeurs, mais ils sont ignorés ici : tous les scénarios entraînent une hausse des prix de l'énergie et il y aura donc un impact sur la compétitivité des autres secteurs (et donc sur l'emploi), lequel n'a pas été mesuré. Par ailleurs, 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. Des travaux d'évaluation plus spécifiques devront ainsi être menés pour définir de manière plus précise les impacts sur l'emploi des différents scénarios. En conclusion, des efforts méthodologiques très importants doivent encore être accomplis pour améliorer la compréhension et la capacité de chiffrage et le recours à des modèles macroéconomiques sera certainement nécessaire.

#### **D) L'impact sur les finances publiques**

##### *Secteur du résidentiel-tertiaire*

Une partie de la dépense des ménages pour l'amélioration de l'habitat sera subventionnée par des aides publiques sous différentes formes. En 2010, les aides publiques de l'État 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 pour le 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 consacrée aux investissements, pour réaliser les scénarios ELE et DIV, il faudrait multiplier par 3 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 5 ou 6 ces investissements.

### *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 taxation 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. Évidemment, l'analyse de l'impact sur les recettes fiscales de l'État 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 compensations) sur la base des émissions de CO<sub>2</sub> énergétique pour chaque scénario et du niveau de taxe carbone (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'État sur le TIC et la TVA des produits fossiles.

### **E) Les trajectoires en termes d'indépendance énergétique et de commerce extérieur**

Les trois scénarios conduisent à une forte baisse de la dépendance énergétique, sous l'effet de la diminution de la consommation des énergies fossiles importées. Le taux de dépendance énergétique d'un pays est un indicateur de politique énergétique permettant d'évaluer la sécurité d'approvisionnement sur le long terme. La diminution de la dépendance par rapport aux pays exportateurs de pétrole et de gaz est un objectif des politiques énergétiques, tant d'un point de vue géostratégique

qu'économique, avec la réduction du déficit de la balance commerciale. L'indépendance énergétique peut se construire sur la maîtrise des consommations et le développement des sources nationales, énergies renouvelables et nucléaire (même si, pour ce dernier, le combustible est aujourd'hui importé, les quantités en jeu sont faibles par rapport à l'énergie produite). L'objectif d'un taux de dépendance inférieur à 30 % peut être atteint en 2050 dans tous les scénarios de transition.

Sur ce plan de la dépendance énergétique, le scénario SOB fait apparaître une baisse plus lente du taux de dépendance qui aboutit en 2050 à 33 % (contre 51 % en 2010). La réduction des consommations d'énergie fossile est moindre dans ce scénario car les substitutions par des sources moins carbonées d'origine nationale sont plus limitées dans le secteur des transports.

Le taux de dépendance du scénario ELE est de 29 % en 2050. La différence essentielle avec le scénario précédent reste modeste, mais 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.

Parmi les trois scénarios, le scénario DIV est le plus performant pour ce critère, avec un taux de dépendance énergétique en 2050 évalué à 23 % et une baisse plus marquée de la consommation de pétrole et de gaz, grâce à un recours plus important à la biomasse domestique notamment.

### **F) Les impacts en termes d'usage des sols**

À plus long terme, le scénario DIV, qui suppose un recours accru à la biomasse, est construit sur l'hypothèse d'un solde du commerce extérieur de biomasse énergétique neutre et d'absence de bouleversement des pratiques culturales. Les surfaces concernées par les cultures dédiées seraient de l'ordre de 50 000 km<sup>2</sup>, soit environ 10 % du territoire, pour atteindre 20 % en tonnes brutes des 30 Mtep de bioénergies. L'évolution des paysages agricoles serait accélérée. L'emprise au sol des énergies solaires et éoliennes serait importante dans tous les scénarios, mais en particulier ELE : elle pourrait représenter près de 700 km<sup>2</sup> pour 60 GW de

solaire et 500 km<sup>2</sup> pour 50 GW d'éolien *onshore*. Mais ce résultat doit être considéré avec prudence car un meilleur usage des surfaces déjà 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.

L'ANCRE a cherché également à analyser des impacts d'autres natures, tels que les risques accidentels, d'origine naturelle, industrielle ou terroriste. Elle se propose dans le futur d'apprécier également 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.

#### 4. Conclusion

L'exercice de prospective mené par l'ANCRE montre que si l'atteinte du facteur 4 (pour le CO<sub>2</sub> énergétique) est envisageable, elle nécessitera, quel que soit le scénario, des efforts importants dans au moins quatre directions : les comportements de consommation (avec des politiques adaptées de réglementation et de prix de l'énergie), la prise en compte du rapport coût-performance des technologies mobilisées, le développement d'infrastructures et de réseaux adaptés, ainsi que des avancées technologiques majeures. La réalisation de ces conditions suppose dans tous les cas des investissements considérables.

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 nouvelles filières industrielles compétitives.

À côté des verrous technologiques, devront être levés les freins liés au passage vers un nouveau système énergétique, moins centralisé, laissant davantage de responsabilité aux territoires et autres parties prenantes pour l'organisation de systèmes énergétiques valorisant les ressources locales. La technologie n'est pas la solution unique à la réussite de la transition énergétique : elle en constitue toutefois une dimension essentielle.

L'ANCRE a formulé des premières propositions en termes de programmation de la recherche pour le projet de loi sur la transition énergétique. Celles-ci portent notamment sur l'intensité de l'effort R&D à fournir et sur les modalités de pilotage à mettre en place, en lien avec la stratégie nationale de la recherche sur l'énergie.

Un des points majeurs de l'étude de scénarios de l'ANCRE est que des technologies nouvelles, certaines en rupture, seront nécessaires pour atteindre le facteur 4 en 2050. L'enjeu est alors de savoir qui produira les équipements et le matériel associé. Pour que la France et l'Europe assurent leur transition énergétique en bénéficiant pleinement de l'effort d'investissement qui devra être consenti, il est crucial que la majeure partie des équipements soit produite localement, et donc qu'un effort de R&D à la hauteur des enjeux soit décidé et coordonné dans la durée avec l'industrie. Il ne s'agit pas seulement de moyens financiers, mais aussi d'organisation et de hiérarchisation des choix, compte tenu des potentiels industriels français et européen. Ainsi, l'Alliance a-t-elle pu se fonder sur l'exercice de scénarios pour proposer à l'ANR les orientations en matière de R&D énergétique. Ces propositions sont aussi prises en compte pour l'élaboration de la stratégie nationale de recherche.

Enfin, la communauté scientifique s'est engagée, au travers de l'ANCRE, dans un travail de longue haleine qui devra encore être affiné à l'avenir et enrichi, par exemple sur l'évaluation des impacts environnementaux. Cet engagement devra permettre de donner à la puissance publique des éléments de compréhension sur l'impact des différentes orientations possibles pour le futur énergétique de la France, mais aussi d'enrichir la réflexion et la connaissance scientifique sur les innovations à mettre en œuvre. ■