



www.agroparistech.fr



MÉMOIRE DE THÈSE PROFESSIONNELLE

De Mathilde MATHIEU

Transition énergétique : des scénarios nationaux aux politiques européennes

Tuteurs :

- Thomas SPENCER, directeur du Pôle Climat de l'Iddri
- Benoît LABBOUZ, doctorant ENGREF - AgroParisTeh

Soutenu le **5 décembre 2013** à Paris, en vue de l'obtention du diplôme de Mastère spécialisé « Politiques publiques et stratégies pour l'environnement » délivré par AgroParisTech-ENGREF.

*Les contenus de ces présentations sont ceux des étudiants
et n'engagent directement ni les encadrants du Mastère Spécialisé
ni AgroParisTech au-delà de la mission d'accompagnement pédagogique*

Remerciements

Nombreux sont ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et comme il faut bien commencer par quelqu'un, je débute ces remerciements par mes collègues de l'Iddri.

Dans un premier temps, j'aimerais remercier Emmanuel Guérin de m'avoir donné l'opportunité de découvrir l'univers passionnant des politiques énergétiques et climatiques européennes au travers de mon stage. Novice en la matière, ce stage a été pour moi un véritable « challenge » !

Je souhaite également remercier Thomas Spencer d'avoir pris la suite de mon encadrement et de m'avoir également donné la chance de poursuivre à l'Iddri sur des projets tous aussi passionnants.

Par ailleurs, je voudrais remercier Andreas Rüdinger pour les riches discussions que nous avons eues et qui m'ont permises d'avancer. Je le remercie également pour sa patience et sa disponibilité pour répondre aux centaines de questions que je lui ai posées (et que je lui pose encore d'ailleurs) !

J'adresse ces remerciements également à Michel Colombier et Sébastien Treyer pour nos discussions passionnantes qui ont véritablement impulsées de nouvelles réflexions.

Du côté de l'ENGREF, je remercie spécialement Benoît Labbouz qui m'a suivie tout le long de mon stage et de l'écriture de ce mémoire, pour ses précieux conseils et pour tous les échanges que nous avons eus. J'ai vraiment apprécié ton encadrement !

Je remercie également Laurent Mermet avec pour la discussion que nous avons eue et qui m'a permis de structurer ma réflexion.

Enfin, je terminerai par remercier Cyril pour ses relectures attentives, ses conseils et son indispensable soutien.

Table des matières

MEMOIRE DE THESE PROFESSIONNELLE	1
Remerciements.....	3
Liste des figures.....	6
Liste des abréviations.....	7
Introduction.....	8
1. Donner un cadrage à l'étude.....	10
1.1. La transition énergétique : enjeux et les leviers d'action.....	10
1.2. Les scénarios énergétiques, des outils d'exploration du futur au service de la transition....	12
1.2.1. Des scénarios de natures différentes, typologie de Börjeson.....	12
1.2.2. Des outils de modélisation diversifiés.....	14
1.3. Les scénarios énergétiques mobilisés dans le processus politique de construction de la transition.....	16
1.3.1. Intérêts des scénarios dans le processus politique.....	16
1.3.2. Les scénarios dans le processus politique : présentation succincte des trois cas d'étude	17
1.4. Etablir un cadre d'analyse approprié.....	18
1.4.1. Les scénarios portent la vision que les pays ont de leurs transitions.....	18
1.4.2. Analyse de la méthode de prospective utilisée.....	18
1.4.3. Analyse du contenu des scénarios, un tableau de bord de la transition.....	19
2. Présentation des trois cas d'étude.....	25
2.1. Allemagne.....	25
2.1.1. Le tournant énergétique allemand a pris plusieurs virages depuis que l'Allemagne s'y est engagée.....	25
2.1.2. Le Leitstudie 2011-2012 : une trajectoire possible pour répondre aux objectifs de l'Energiewende.....	26
2.1.3. Conclusion.....	33
2.2. Royaume Uni.....	34
2.2.1. Une transition pilotée par des « budgets carbone ».....	34
2.2.2. Les scénarios du Climate Change Committee et les « 2050 Pathways » de la DECC.....	36
2.2.3. Des leviers de décarbonisation différents pour les trois scénarios.....	38
2.2.4. Conclusion.....	42
2.3. France.....	42
2.3.1. Un débat pour dessiner l'avenir de la transition énergétique.....	42

2.3.2. Quatre trajectoires illustrent les futurs possibles et souhaitables du système énergétique français	43
2.3.3. Toutes les trajectoires ne respectent pas les engagements climatiques et énergétiques de la France.....	47
2.3.4. Conclusion	48
2.4. Des approches différentes	49
3. Utiliser les résultats de l'analyse comparative des scénarios pour alimenter la discussion européenne : cas du secteur électrique et des transports	51
3.1. Eléments clés de la politique énergétique et climatique européenne.....	51
3.2. Le secteur des transports.....	55
3.2.1. Electrification des transports	55
3.2.2. Pénétration du vecteur gaz	57
3.3. Le secteur électrique	59
Conclusion	63
Références.....	65
Glossaire des énergies	66

Liste des figures

Figure 1 Graphique représentant les émissions de GES de la France, l'Allemagne et le Royaume Uni en 2011 pour le secteur de l'énergie et pour les autres secteurs. Source UNFCC.	11
Figure 2 Schéma représentant les différents leviers d'action en termes de maîtrise de la demande énergétique, d'introduction de nouveaux vecteurs énergétiques et d'innovations (technologiques et sociales).....	21
Figure 3 Schéma représentant les différents leviers d'action pour décarboniser la production	22
Figure 4 Exemple du tableau utilisé dans la partie III (I= Importance, P=Précision, V=Variabilité).....	24
Figure 5 Graphique représentant l'évolution de la consommation d'énergie primaire de l'Allemagne de 2010 à 2050 en PJ	28
Figure 6 Graphique représentant la réduction de la consommation d'énergie finale par secteur entre 2010 et 2050.....	28
Figure 7 Graphiques schématisant le phénomène de décohabitation	29
Figure 8 Evolution de la mobilité des personnes et des marchandises mise en regard avec la croissance économique.....	30
Figure 9 Evolution de la production d'électricité entre 2010 et 2050, scénario A.....	31
Figure 10 Evolution de la capacité installée d'énergies renouvelables entre 2010 et 2050, scénario A	32
Figure 11 Contribution des deux leviers efficacité énergétique et énergies renouvelables dans la décarbonisation du système énergétique sous ses trois formes (électricité, chaleur, carburant) (scénario A)	33
Figure 12 Graphique représentant les émissions de GES du Royaume Uni entre 1990 et 2009, et les budgets carbone inscrits dans la loi. Source : DECC, 2010	34
Figure 13 Logique de construction des scénarios du Carbon Plan. Source : Carbon Plan, 2011.....	37
Figure 14 Evolution de la demande finale en énergie dans les trois scénarios. Source : http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/	39
Figure 15 Evolution de la consommation d'électricité dans les trois variantes RES, CCS et Nuclear. Source : http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/	40
Figure 16 Contenu CO2 de l'électricité produite dans les trois scénarios. Source : http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/	41
Figure 17 Composition du mix de production d'électricité en 2010 et en 2050 dans les trois scénarios RES, CCS et Nuclear. Source : http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/	41
Figure 18 Répartition des émissions CO2 par rapport à 1990 réparties par facteurs en 2050 dans les scénarios RES, CCS et Nuclear. Source : http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/	41
Figure 19 Evolution de la consommation d'énergie primaire entre 2010 et 2050 pour les 4 trajectoires. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013).....	45
Figure 20 Consommation d'énergie finale et objectif efficacité énergétique de la France. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013).....	48
Figure 21 Part du nucléaire dans le mix électrique et objectif 50% de François Hollande. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013).....	48
Figure 22 Émissions de GES dans l'UE –Vers une réduction des émissions internes. Source: EC, 2011	52
Figure 23 Evolution du prix au comptant des crédits carbone, en euros/tonnes de CO2. Source : CDC Climat	53
Figure 24 Comparaison des scénarios dans le secteur des transports pour le levier électrification (I=importance, P=précision, V=variabilité).....	56

Liste des acronymes

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

CCS : Carbon Capture and Storage, ou, en français, Stockage géologique du CO₂

CE/EC : Commission européenne/European Commission

CO₂ : Dioxyde de carbone

DEC : dénomination de la trajectoire française « Demande moyenne et diversification »

DNTE : Débat national sur la transition énergétique

DIV : dénomination de la trajectoire française « Demande moyenne et diversification »

EFF : dénomination de la trajectoire française « Efficacité énergétique et diversification »

ENR : Énergie renouvelable

ETS : Emission Trading System

GES : Gaz à Effet de Serre

Iddri : Institut du développement durable et des relations internationales

kWh/MWh : Kilowattheure/Mégawattheure

Mt : Million de tonnes

MTEP/MTOE : Million de tonnes équivalent pétrole

PIB/GDP : Produit intérieur brut/Gross Domestic Product

RES : Renewable Energy Sources

SOB : dénomination de la trajectoire française « Sobriété énergétique et sortie du nucléaire »

TEP/TOE : Tonne équivalent pétrole/Tons Oil Equivalent

UE : Union européenne

Introduction

En mars 2014 s'ouvriront les négociations sur le prochain paquet énergie-climat européen qui prépareront les politiques énergétiques et climatiques européennes de la décennie 2020-2030. Ces négociations ont pour objectif avant tout de définir des engagements en matière de climat qui permettront de maintenir la crédibilité de l'Union Européenne (UE) dans les négociations internationales sur le climat (COP¹) et de lui donner une position de leader dans ces négociations. L'UE devra statuer sur ses engagements en matière de climat à l'horizon 2030 avant la COP21 qui se déroulera à Paris en 2015, date à laquelle tous les pays seront amenés à donner des engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique à +2°C.

L'actuel paquet énergie-climat européen fixe des objectifs en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique à atteindre d'ici 2020. Toutefois, certains pays ont fixé des objectifs qui vont au-delà de ceux arrêtés par l'UE, en termes d'ambition mais aussi d'horizon temporel. Ces pays ont ainsi engagé une transition énergétique qui s'étend sur la décennie 2020-2030 et au-delà. Dans un tel contexte, l'UE ne peut pas construire ses politiques sans avoir auparavant consulté ses États Membres car dans le cas contraire, elle prendrait le risque de freiner les transitions nationales. Ainsi pour contribuer à la discussion sur la forme et le contenu des futures politiques énergétiques et climatiques européennes, l'Iddri a choisi de mener une étude sur les visions de long terme des États Membres en matière de transition énergétique. L'étude porte sur trois pays, l'Allemagne, la France et le Royaume Uni qui sont leaders en matière de politiques énergétiques et climatiques européennes. La mission professionnelle réalisée s'inscrivait dans ce projet. L'Iddri m'a ainsi confié l'étude des scénarios nationaux et des contextes politiques des trois pays cités. Le travail effectué a donc porté sur une étude quantitative approfondie des scénarios, et sur la compréhension des processus politiques de transition énergétique de ces pays menés au travers de lectures, d'entretiens avec des acteurs impliqués dans le processus politique et des discussions en interne à l'Iddri.

Lors de cette mission professionnelle, plusieurs problématiques ont été soulevées, notamment dans l'étude et la comparaison des scénarios. En effet, les scénarios sont des objets d'étude complexes et sont à manipuler avec précaution car ils ne sont ni des prédictions, ni des projections. En d'autres termes, ils sont fondés sur l'incertitude et ne représentent donc pas des « plans » de transition énergétique. Par ailleurs, les exercices prospectifs mobilisés sont très diversifiés ce qui rend leur comparaison difficile. Enfin, une analyse comparative doit avoir une finalité. Elle sert ici à alimenter les débats à l'échelle européenne. Ces trois éléments m'ont conduite à la problématique suivante :

En quoi l'analyse des scénarios nationaux de transition énergétique peut alimenter une réflexion sur l'élaboration des politiques européennes de l'énergie et du climat ?

Ce mémoire a pour objectif de répondre à cette problématique en structurant la réflexion en trois parties. La première sera consacrée à identifier les caractéristiques des scénarios énergétiques et le lien entre l'objet scénario et le concept de « vision de long terme » d'une part. D'autre part, elle proposera un cadre d'analyse qui permet de mener une analyse comparative des scénarios dans le but d'identifier les enjeux et défis pour la politique européenne future.

¹ Conférence des Parties signataires de la Convention Climat (COP).

Dans la deuxième partie, les trois cas d'étude seront présentés, en s'intéressant au contexte politique de chaque pays et aux scénarios mobilisés dans ce processus politique.

Enfin, après un aperçu des politiques énergétiques et climatiques européennes existantes, les résultats de l'analyse comparative seront donnés pour deux secteurs en particulier : le secteur des transports et le secteur électrique. Cette partie n'est pas prescriptive, elle a pour objectif de mettre en exergue les défis des politiques européennes futures qu'il serait intéressant de mettre en discussion lors de leur élaboration.

1. Donner un cadrage à l'étude

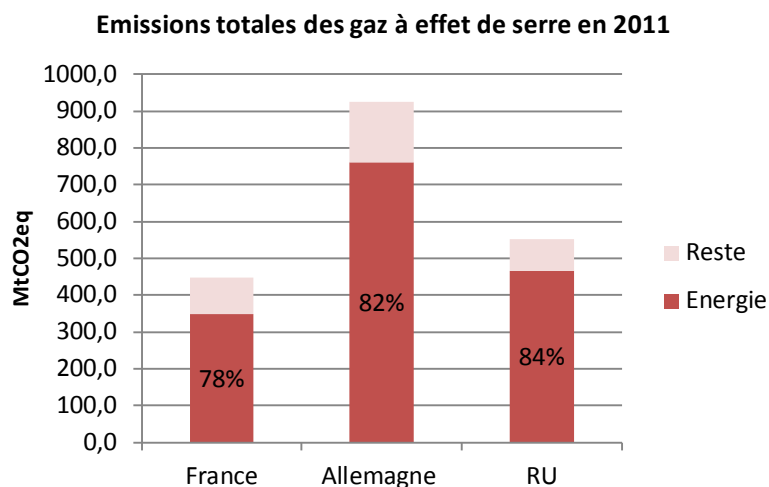
Dans cette première partie, nous fixerons le périmètre de l'étude. Nous verrons dans un premier temps ce qu'est le concept de « transition énergétique ». Puis nous nous intéresserons à l'objet d'étude qui est le scénario énergétique et nous ferons le lien avec la notion de « vision de long terme » évoquée dans l'introduction. Nous terminerons cette partie en proposant un cadre d'analyse des scénarios qui nous permettra de donner des éléments de réflexion sur la politique européenne.

1.1. La transition énergétique : enjeux et les leviers d'action

Les préoccupations face au changement climatique grandissent et la réduction significative des émissions pour les pays fortement émetteurs comme ceux d'Amérique du Nord (les États-Unis et le Canada produisaient 19,4% des émissions de GES mondiales et étaient au premier rang de la quantité d'émissions par habitant en 2007) ou d'Europe (11,4% des émissions mondiales en 2007) est devenue inévitable pour maintenir l'augmentation de la température à la surface du globe inférieure à 2°C, engagement international pris lors de la Conférence des Parties de 2009 à Copenhague. Dans ce contexte, de nombreux pays prennent des engagements sur le long terme de réduction des émissions. L'Allemagne et le Royaume Uni ont par exemple fixé un objectif de réduction des émissions à 2050 de 80% par rapport au niveau de 1990, la France quant à elle s'est engagée à réduire par un facteur 4 ces émissions en 2050.

Dans de nombreux pays, la plus grande partie des émissions est due au secteur énergétique et est issue de la combustion des énergies fossiles sous toutes ses formes (carburant, liquide ou gazeux pour la production d'électricité et de chaleur). En Europe, plus de 85% des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont liées au secteur énergétique. La Figure 1 montre la part des émissions liées au secteur énergie dans les émissions totales des trois pays considérés dans cette étude (la France, l'Allemagne et le Royaume Uni). Dans les trois cas, ce pourcentage s'élève approximativement à 80% (le reste des émissions étant principalement dues aux émissions liés aux processus industriels et à l'agriculture).

Figure 1 Graphique représentant les émissions de GES de la France, l'Allemagne et le Royaume Uni en 2011 pour le secteur de l'énergie et pour les autres secteurs. Source UNFCC.



La décarbonisation² du système énergétique suppose une transformation en profondeur du système, et cette transformation est au cœur de la transition énergétique.

Les pays de l'Union Européenne importent en grande partie les énergies fossiles dont ils ont besoin (pétrole, gaz, charbon). Dans un contexte de raréfaction des ressources, ils envisagent de diminuer la consommation de ces énergies afin de réduire leur dépendance vis-à-vis des pays exportateurs.

La transition énergétique consiste à transformer le système énergétique sur l'ensemble de la chaîne, depuis le système de production jusqu'à la consommation finale d'énergie (consommée par les utilisateurs). Nous pourrions prendre, pour illustrer une telle transformation, un exemple dans le secteur des transports où les véhicules conventionnels fonctionnant à l'essence ou au diesel seraient progressivement remplacés par des véhicules électriques, alimentés par une électricité issue de sources d'énergie renouvelable (éolien, solaire, énergies marine et hydraulique, ou encore géothermie) ou nucléaire. Ces transformations impacteraient également les infrastructures d'alimentation des véhicules puisqu'il faudrait remplacer les actuelles stations-service par des bornes de recharge des véhicules électriques.

Le changement d'un système énergétique porte sur tous les secteurs de l'économie. D'une part ce changement repose sur la réduction significative des consommations énergétiques, avec entre autre une meilleure efficacité énergétique des bâtiments, des appareils électriques, des machines industrielles, des véhicules, etc. et avec davantage de sobriété. On peut citer plusieurs exemples de mesures de sobriété, des exemples concernant des changements de comportement comme la réduction de la température des habitations ou la limitation de la vitesse des véhicules sur les routes, mais aussi des exemples qui relèvent de véritables choix de société comme la limitation de l'étalement urbain qui permet notamment de réduire les besoins en transport. D'autre part, il est bâti sur la décarbonisation du système de production qui revient à substituer dans la production les hydrocarbures par la biomasse (sous l'état liquide, solide ou gazeux) ou à utiliser davantage d'électricité peu carbonée produite essentiellement par les énergies renouvelables et le nucléaire.

² La décarbonisation du système énergétique correspond au processus de réduction des émissions de GES du système.

Par ailleurs, l'innovation est également un pilier de la transition énergétique car l'introduction de nouvelles technologies dans le système peut permettre d'amorcer ou d'accélérer le changement.

Certains pays d'Europe ont déjà engagé leur transition énergétique. Cette transition a été amorcée ou renforcée par la mise en place du paquet énergie-climat européen. A ce jour, quelques pays ont pris des engagements au-delà de ceux du paquet énergie-climat, qui prend fin en 2020. Ils ont donc une vision à long terme de leur transition énergétique.

Elaborer les politiques européennes de l'énergie et du climat de la décennie 2020-2030 nécessite une bonne compréhension de la vision que les pays ont de leur transition énergétique. Pour cela nous avons choisi de rechercher et d'analyser les éléments prospectifs mobilisés dans le processus politique qui vise à mettre en œuvre leur transition.

En effet, l'avenir est incertain. Il n'est pas à découvrir mais à construire, nous dit Gaston Berger, philosophe à l'origine du mot « prospective ». C'est dans cette perspective, d'un avenir à inventer, que s'inscrit la transition énergétique. Pour engager une transition énergétique, les pays ont besoin de dresser l'image du modèle de société vers lequel ils souhaitent se diriger, et d'envisager les trajectoires possibles pour y parvenir. Ainsi, l'incertitude sur l'avenir et le « temps long³ » dans lequel s'inscrit la transition énergétique, amènent les pays à faire appel aux scénarios énergétiques pour construire leur transition.

1.2. Les scénarios énergétiques, des outils d'exploration du futur au service de la transition

« Basically, scenarios are plausible, challenging, and relevant stories about how the future might unfold, which can be told in both words and numbers. Scenarios are not forecasts, projections, or predictions. They are about envisioning future pathways and accounting for critical uncertainties. The process of building scenarios is about asking questions as well as suggesting answers and guidance for action. It is intended to widen perspectives and illuminate key issues that might otherwise be missed or dismissed. », (Raskin et al., 1995)

Les scénarios énergétiques sont souvent des exercices de prospective quantitative issus de modélisations. Ils ont pour objectif de donner une trajectoire d'évolution possible du système énergétique voire de la société dans son ensemble (Bellevrat et al., 2013).

Ils peuvent être de différentes natures. La section 1.2.1 vise à présenter les différentes catégories de scénarios classifiés selon la typologie de Börjeson, qui est une typologie parmi de nombreuses autres que compte la littérature consacrée à l'étude du temps long. La section 1.2.2, quant à elle, est consacrée à présenter la diversité des outils de modélisation existants.

1.2.1. Des scénarios de natures différentes, typologie de Börjeson

Il existe plusieurs manières de construire des scénarios et l'élaboration des scénarios dépend avant tout de l'usage que l'on veut en faire. Nous avons choisi pour cette étude de présenter les différentes catégories de scénarios proposées par Börjeson et al. (2006). Cette approche centrée sur l'utilisateur

³ Les échelles de temps sur lesquelles les pays mobilise la prospective sont du moyen terme (2030) voire long terme (2050).

(ou le commanditaire) du scénario, nous semble particulièrement pertinente pour notre analyse de scénario. Aussi, nous mobiliserons certains de ces concepts dans notre analyse.

L'approche proposée par Börjeson répartit les scénarios en trois grandes catégories. Ces catégories sont formées en fonction de la question initiale que se pose un utilisateur lorsqu'il fait appel aux scénarios.

- "What will happen?"
- "What can happen?"
- "How can a specific target be reached?"

Ces trois questions représentent trois catégories de scénarios. Ces catégories traduisent différentes manières d'appréhender les scénarios comme relevant du probable, du possible ou du souhaitable.

1.2.1.1. Catégorie « What will happen? » : les scénarios prédictifs

Ces scénarios sont appelés « *prédictifs* ». Ils tentent d'être le « plus proche possible » de la réalité, ou autrement dit de ce qui va se passer. Ces scénarios sont utilisés pour prévoir des événements qui peuvent se passer à court terme, voire moyen terme. Ils sont plutôt mobilisés aux fins d'une planification ou par des investisseurs. Les décideurs politiques peuvent utiliser ces scénarios pour s'informer sur des événements qui ont de grandes chances d'advenir dans les conditions actuelles de développement, et prendre des décisions en conséquence.

1.2.1.2. Catégorie « What can happen ? » : les scénarios exploratoires

Les scénarios appartenant à cette catégorie sont baptisés « *exploratoires* ». Ils sont utilisés pour explorer plusieurs situations qui pourraient advenir. Plusieurs scénarios contrastés sont souvent élaborés pour couvrir le champ des possibles. Une partie des scénarios appartenant à cette catégorie sont des scénarios dits « *stratégiques* ». Ces scénarios intègrent la dimension politique et visent à décrire les conséquences possibles d'une décision politique. Les décideurs politiques peuvent donc utiliser ces scénarios, pour avoir une idée des conséquences de la mise en œuvre d'une politique donnée ou de l'absence de mesures, ou bien pour s'informer sur les impacts potentiels d'une décision politique et des variations possibles de ces impacts quand les hypothèses structurantes changent.

En France par exemple, une série de scénarios ont été construits en 2011 pour la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) dans le but de simuler l'évolution des consommations d'énergie et des émissions de GES à l'horizon 2020-2030. Cette série comprenait un scénario Grenelle dit *AMS - Objectifs* (Avec Mesures Supplémentaires) qui prenait en compte l'effet des mesures et l'atteinte des objectifs prévus par les lois Grenelle I et II, à l'horizon 2020 et 2030, de façon à pouvoir en évaluer l'ambition et l'impact.

1.2.1.3. Catégorie « How can a specific target be reached? » : les scénarios normatifs

Ces scénarios sont appelés « *normatifs* ». Ils permettent de simuler des trajectoires possibles pour atteindre certains objectifs. Cette catégorie est associée à une méthode de construction des

scénarios appelée « backcasting ». Les scénarios construits en *backcasting* sont élaborés à partir de l'image finale que l'on veut atteindre. Borjeson distingue deux sous catégories, les scénarios dits « preserving » et « transforming », en fonction du degré de transformation du système prévu par la trajectoire pour atteindre les objectifs donnés.

Un exemple représentatif de cette catégorie est le scénario allemand *Leitstudie 2011*, construit avec une méthode de *backcasting*, qui propose une trajectoire possible pour réaliser l'ensemble des objectifs de l'*Energiewende* (tournant énergétique), qui est le projet politique de transition énergétique de l'Allemagne sur lequel nous reviendrons dans la partie suivante.

1.2.2. Des outils de modélisation diversifiés

Les scénarios sont généralement les résultats de modélisation. Les modèles sont des systèmes d'équations au travers desquels on entend représenter les interactions entre différentes variables du système modélisé. Il s'agit d'une représentation simplifiée de la réalité. Pour élaborer des scénarios énergétiques plusieurs outils de modélisation existent. Ces outils peuvent être utilisés en fonction de ce que l'on souhaite modéliser (économie, système énergétique) et de l'utilisation stratégique que l'on souhaite faire du scénario. Une catégorisation des scénarios a été préalablement proposée par E. Bellevrat & al. (2013). Nous avons choisi de présenter cette typologie (Tableau 1) car elle est éclairante pour réaliser l'analyse comparée.

Tableau 1 Typologie des modèles mobilisés pour répondre aux problématiques énergétiques et climatiques

Approche	Types de modèles	Types de scénarios	Périmètre (énergie - économie)	Question centrale à laquelle le modèle permet de répondre
Bottom-up	Technique/comptable	Exploratoire/Normatif	Demande	Estimation de potentiels, mesure d'impacts des politiques et mesures
	Technico-économique	Exploratoire/Normatif	Offre/Demande	Questions propres au secteur énergétique, éventuellement sous contrainte
	Optimisation	Optimisation	Offre	Trajectoire optimale selon critère économique
Top-down	Equilibre général	Exploratoire/Normatif	Macroéconomie	Fondamentaux économiques, éventuellement sous contraintes
	Macro-économétrique	Prédictif/ Extrapolation	Macroéconomie	Prolongation de tendances, étude d'impacts économiques
Hybride	Hybride	Exploratoire/Normatif	Macro+ offre/demande	Interaction économie/énergie, éventuellement sous contrainte

1.2.2.1. La dualité Bottom-up/Top-down

La typologie la plus répandue répartit les scénarios en deux groupes : *bottom-up* et *top-down*. L'appellation « top » et « bottom » correspond à des niveaux d'agrégation différents. La catégorie top-down comprend les modèles fondés sur des théories macroéconomiques ou des techniques

économétriques (statistiques sur des données de consommation, prix, revenus et facteurs de coûts). Les principales critiques faites à cette catégorie concernent leur incapacité à représenter de manière tangible les potentiels techniques (Crassous, 2008; van Vuuren *et al.*, 2012). On oppose à cette catégorie les modèles ayant une approche bottom-up qui cherchent davantage à modéliser des potentiels technologiques et des contraintes physiques pesant sur le système énergétique. Mais les modèles bottom-up ne s'intéressent pas au « rôle du système économique entier dans l'évolution des signaux-prix et des contraintes de budget qui sont déterminantes dans la bifurcation des systèmes techniques » (Crassous, 2008). De cette dualité a émergé l'approche *hybride* qui a pour vocation d'interconnecter les deux approches précédemment citées.

1.2.2.2. Une diversité de modèles qui permet de choisir un outil adapté

Une grande variété de modèles existe. La typologie proposée ci-dessus représente une classification possible en fonction de l'approche de modélisation utilisée. Ces approches sont très différentes (les modèles dits « d'économistes » s'opposent aux modèles dits « d'ingénieurs ») mais peuvent être complémentaires. Nous décrivons dans cette sous-section leurs principales caractéristiques et ce qui les différencie.

Technique/comptable : Ce type permet de modéliser la demande en énergie mais ne prend pas en compte la dimension économique. Ces modèles peuvent être mobilisés pour évaluer l'impact de certaines mesures politiques sur la demande.

Technico-économique (bottom-up, dits « d'ingénieurs ») : Ces modèles appartiennent également à la catégorie bottom-up mais contrairement à ceux de la classe précédente, ils prennent en compte l'existence d'une économie. Ces modèles permettent d'identifier et de mesurer les potentiels de réduction d'émissions dans différents secteurs, que ce soit au niveau de la demande d'énergie ou de l'offre énergétique. Cette approche de modélisation donne une première idée des priorités politiques à mettre en œuvre.

Optimisation (bottom-up, dits « d'ingénieurs ») : Ces modèles appartiennent également à la catégorie bottom-up. Les modèles d'optimisation permettent de déterminer le mix énergétique optimal d'un point de vue économique (on parle de trajectoire « coût-efficace ») qui répond à la demande tout en respectant les contraintes prédéfinies par l'utilisateur. Ceux-ci donnent donc des trajectoires optimisées en fonction des hypothèses de coût formulées. De la même manière que précédemment, ils permettent d'avoir une idée des priorités politiques à mettre en œuvre établies à partir de critères économiques.

Modèles économétriques (top-down, dits « d'économistes ») : Les modèles économétriques sont basés sur des analyses statistiques, des analyses de tendances. Ils modélisent les liens entre variables macroéconomiques à partir de données statistiques passées et permettent d'en déduire des tendances futures. Les modèles macro économétriques basés sur l'extrapolation de tendance sont souvent utilisés pour réaliser des scénarios « Business As Usual » (BAU⁴).

⁴ Les scénarios BAU sont souvent utilisés pour avoir une idée de l'évolution d'un système si aucune mesure politique n'est mise en œuvre.

Equilibre général (top-down, dits « d'économistes »): Les modèles d'équilibre général représentent les mécanismes économiques de manière dynamique. Ils résultent d'une analyse des systèmes économiques. Ils font souvent l'objet de controverses car ils sont issus de théories économiques.

1.3. Les scénarios énergétiques mobilisés dans le processus politique de construction de la transition

Que ce soit en termes de techniques d'élaboration, d'approches de modélisation ou de combinaisons de données d'entrée, l'outil scénario peut prendre de multiples formes. Cette diversité permet de répondre à la diversité des besoins puisqu'ils peuvent intervenir de différentes manières dans les processus politiques. Cette section présentera les principaux intérêts des scénarios dans le processus politique et abordera la question du rôle joué par ces derniers dans le processus.

1.3.1. Intérêts des scénarios dans le processus politique

L'utilisation de ces outils d'exploration du futur dans le processus politique présente plusieurs intérêts. Dans un premier temps, comme nous l'avons vu précédemment, les changements s'opèrent à travers l'ensemble des secteurs de la société. Il est nécessaire d'avoir des outils à disposition pour modéliser les relations entre secteurs et leurs évolutions. Les scénarios permettent ainsi d'avoir une idée des effets de la transition sur l'ensemble des secteurs et peuvent permettre d'établir une vision commune de la trajectoire de changement.

Dans de nombreux cas, les scénarios représentent des trajectoires possibles pour atteindre un objectif donné. La construction de ces trajectoires permet d'identifier les enjeux de la transition et les leviers d'action potentiels. Une fois cette étape franchie, les scénarios peuvent être utilisés pour renseigner les décideurs politiques sur la nature et le rythme des choix politiques à mettre en œuvre. Ils peuvent également servir à évaluer les conséquences futures de certaines décisions politiques, et leurs interactions possibles. Par exemple dans le secteur électrique, la France sera amenée à prendre une décision pour répondre au défi que pose le vieillissement des centrales nucléaires : poursuivre avec du nucléaire ou changer vers les énergies renouvelables ? Les scénarios peuvent permettre d'identifier à la fois l'impact des choix qui pourront être faits pour le remplacement des centrales anciennes et l'échéance de la décision à prendre pour que ces choix soient réalisables (la durée moyenne de construction d'une centrale nucléaire est de 6 ans).

Enfin, la transition doit mobiliser tous les acteurs de la société. Certains acteurs se fédèrent autour de projets de société qui portent des valeurs partagées. Ces projets s'appellent « visions mobilisatrices ». Ces visions mobilisatrices ont donc un rôle important pour rassembler, unir les acteurs de la société autour d'un projet. Dans ce cas, les scénarios peuvent permettre de tester et « valider » la faisabilité et les impacts de ces visions mobilisatrices sur l'ensemble de la société. Par exemple, la modélisation d'un choix politique comme le renoncement à l'énergie nucléaire permet d'avoir une meilleure compréhension des enjeux et des conséquences d'un tel choix sur l'ensemble de la société. Les scénarios peuvent ainsi alimenter un débat sur les choix de société ou rendre ces visions mobilisatrices plus crédibles aux yeux de certains acteurs.

Les points présentés ci-dessus montrent donc l'intérêt d'utiliser les scénarios dans le processus. Selon les pays, les scénarios peuvent jouer différents rôles dans le processus politique. Ils peuvent être support d'un débat public, mettre certaines problématiques à l'agenda politique, ou encore être

une trajectoire de référence et justifier des choix politiques, etc. Ces rôles sont nombreux et complexes à étudier comme le montrent Martin Van Der Steen et Mark Van Twist, dans leur étude sur le rôle et l'impact des scénarios dans le processus politique (van der Steen & van Twist, 2012). La sous-section suivante présentera de manière synthétique les scénarios que nous avons analysés dans cette étude et la place donnée aux scénarios dans le processus politique.

1.3.2. Les scénarios dans le processus politique : présentation succincte des trois cas d'étude

La première étape du travail a été de cibler la nature et l'avancement du processus politique et de la place des scénarios dans celui-ci pour chaque pays. Dans cette section, nous n'en donnerons qu'un aperçu puisque cela sera davantage détaillé dans la partie 2. Les scénarios ont été sélectionnés d'une part en fonction de leur place dans le processus politique et d'autre part, en fonction du degré de représentativité de la vision du Gouvernement. Les scénarios choisis sont donc des exercices prospectifs mobilisés par les Gouvernements pour construire leurs politiques de transition.

Allemagne : L'Allemagne a un projet de transition appelé Energiewende, ou « tournant énergétique » en français. L'Energiewende repose sur :

- L'Energiekonzept (« concept énergétique ») qui regroupe une série d'objectifs notamment sur la réduction des émissions de GES, la maîtrise de la demande en énergie et le développement en énergies renouvelables.
- La sortie du nucléaire en 2022

En 2012, le Gouvernement a produit un scénario phare appelé Leitstudie qui représente une trajectoire possible pour atteindre les objectifs de l'Energiewende. Ce scénario représente une sorte de trajectoire de référence à suivre pour mettre en œuvre l'Energiewende.

Royaume Uni : Le Royaume Uni construit sa transition autour de son Climate Act, une loi (2008) introduisant le principe de budgets carbone, quantité de CO₂ que le Royaume Uni est autorisé à émettre sur des périodes successives de 5 ans. Ils sont inscrits dans la loi et doivent suivre une trajectoire d'émissions. Un plan climat, le Carbon Plan publié par le Gouvernement décrit les mesures politiques que le Gouvernement prévoit de prendre dans chaque secteur pour atteindre les objectifs de réduction des émissions fixés par les budgets carbones. Nous avons choisi de prendre pour objet d'étude les scénarios qui ont été produits par le ministère de l'énergie et du climat pour élaborer le Carbon Plan.

France : Durant le premier semestre 2013, le Gouvernement français a lancé le Débat National sur la Transition Énergétique (DNTE) qui devrait aboutir au premier semestre de l'année 2014 à une loi de programme fixant les grandes orientations de la politique énergétique française. Un des objectifs de ce débat était également de déterminer une trajectoire consensuelle d'évolution du système énergétique français. Nous nous sommes donc intéressés aux travaux qui ont été réalisés par le groupe d'experts sur les scénarios. Le principal résultat des travaux de ce groupe est une définition de quatre trajectoires contrastées issues de la confrontation de l'ensemble des scénarios énergétiques existants en France.

Les situations varient beaucoup selon les pays, aussi bien dans la nature du processus de transition que dans le rôle joué par les scénarios. Les scénarios mobilisés sont également très contrastés et

cette diversité rend l'analyse comparative complexe, ce qui nous impose d'établir un cadre d'analyse commun approprié.

1.4. Établir un cadre d'analyse approprié

Deux questions principales se posent pour l'analyse comparative :

- Comment mener une analyse comparative d'exercices prospectifs aussi diversifiés ?
- Quels éléments prendre en compte pour alimenter une réflexion sur la construction des politiques européennes de l'énergie et du climat ?

L'approche que nous défendons pour la construction des futures politiques européennes de l'énergie et du climat, nécessite de comprendre comment les pays envisagent leurs transitions, sur quelle voie ils souhaitent ou sont en train de s'engager. Nous verrons dans cette section dans quelle mesure nous pouvons percevoir cela dans les scénarios.

1.4.1. Les scénarios portent la vision que les pays ont de leurs transitions

Nous prendrons l'hypothèse que les scénarios mobilisés dans le processus politique de transition portent la vision que les pays ont de leurs transitions. En effet, les données d'entrée des modèles et les logiques de modélisation sont empreintes de leur contexte de production (Fernandez, Bouleau, & Treyer, 2011); (O'Neill, Pulver, VanDeveer, & Garb, 2008). Par ailleurs, Garb écrit que la manière dont est effectuée la commande et la procédure de construction des scénarios portent les marques des contextes politiques, sociaux et organisationnels (Garb, Pulver, & VanDeveer, 2008). Les scénarios portent donc les marques du contexte dans lequel ils sont produits. Ils transcrivent la représentation des problèmes et des solutions de ceux qui commandent, produisent et utilisent⁵ les scénarios.

Si nous appliquons ces concepts à notre problématique, cela signifie que nous considérons que les scénarios énergétiques sélectionnés expriment le cadrage qui est pris pour aborder les problématiques liées à la transition et donner une réponse aux enjeux identifiés. Selon Pinter (Pinter, 2002) ce « cadrage »⁶ correspond à « la manière dont sont conceptualisés, analysés et présentés les problèmes ». Dans notre cas il s'agit des problèmes liés au changement climatique et par voie de conséquence au secteur de l'énergie.

Le cadre d'analyse que nous allons établir dans les sous-sections suivantes permet de donner les grandes lignes de ce cadrage. Nous dissociions deux aspects du cadrage, qui correspondent à deux niveaux d'analyse :

- Analyse de la méthode de prospective utilisée (format, thème de variation, approche de modélisation)
- Analyse du contenu (définition des enjeux et leviers d'action mobilisés)

1.4.2. Analyse de la méthode de prospective utilisée

Un premier niveau d'analyse est axé sur les éléments qui structurent l'exercice de modélisation. De ces éléments qui jouent un rôle structurant dans l'exercice, nous pouvons en citer quatre :

⁵ Nous considérons que les commanditaires sont également les utilisateurs.

⁶ Pinter en anglais parle de « framing ».

- Format : Type de scénario ? Technique de scénarisation ?
- Variantes : Nombre de variantes ? Degré de variabilité ? Thèmes de variation ?
- Outil de modélisation : Modèle utilisé ?
- Hypothèses structurantes : Quelles données d'entrée ?

Format : Nous nous intéresserons au type de scénario (prédictif/ exploratoire/ normatif) et à la technique de scénarisation associée (backcasting/ forecasting). Un scénario normatif traduit une trajectoire balisée, une trajectoire jalonnée d'objectifs. Il s'agit d'un processus politique « normé », dans lequel des règles et des objectifs ont déjà été établis. A l'inverse, les scénarios exploratoires révèlent plus d'incertitudes quant au choix d'un futur souhaitable vers lequel le pays veut se diriger. Les scénarios exploratoires sont davantage mobilisés pour alimenter une discussion, un débat.

Variantes : Le nombre de variantes, leurs degrés de variabilité ainsi que les thèmes de variation sont des indicateurs d'incertitude. Ils révèlent des zones d'incertitudes. A titre d'exemple, en Allemagne, le Leitstudie 2011 possède trois variantes portant uniquement sur le secteur des transports. Ainsi, les incertitudes majeures qui transparaissent au travers de ce scénario sont sur le développement des technologies dans le secteur des transports.

Outil de modélisation : Le modèle traduit une certaine représentation de la réalité. Il nous renseigne sur l'approche utilisée pour comprendre et répondre aux enjeux de la transition. Ainsi le choix du modèle met en exergue les points clés considérés comme vecteur de changement. Par exemple, les modèles d'optimisation nous indiquent que le coût est une préoccupation centrale. Le choix d'utilisation d'un modèle d'optimisation montre une préférence pour la réduction des coûts à court terme plutôt que la mise en place de solutions coûteuses à court terme qui seraient nécessaires pour atteindre les objectifs de long terme (Börjeson *et al.*, 2006).

Hypothèses structurantes : Enfin l'analyse des données d'entrée des modèles, aussi appelée hypothèses structurantes (comme par exemple le PIB, la population, le coût des technologies), donne un aperçu des perspectives de croissances économique et démographique, et de l'évolution des technologies. Par exemple, dans les modèles d'optimisation, les hypothèses de coût sur les technologies sont des données d'entrée du modèle et jouent un rôle déterminant dans la composition du mix de production d'énergie.

1.4.3. Analyse du contenu des scénarios, un tableau de bord de la transition

Le cadre d'analyse du contenu des scénarios porte sur les leviers mobilisés pour amorcer et structurer le changement. Ce changement peut se faire en agissant à plusieurs niveaux :

- agir sur la consommation (maîtrise de la demande) ;
- agir sur la production (décarboniser la production) ;
- introduire de nouveaux vecteurs-énergie⁷ ;
- les innovations (technologiques et sociales).

⁷ Un vecteur énergie correspond au moyen de transport de l'énergie (comme l'électricité par exemple). « L'introduction de nouveaux vecteurs énergie » dans un secteur signifie que le changement dans ce secteur se structure autour de ces nouveaux besoins énergétiques. Par exemple, l'introduction du vecteur électricité dans le secteur des transports impliquent la transformation entière de la filière.

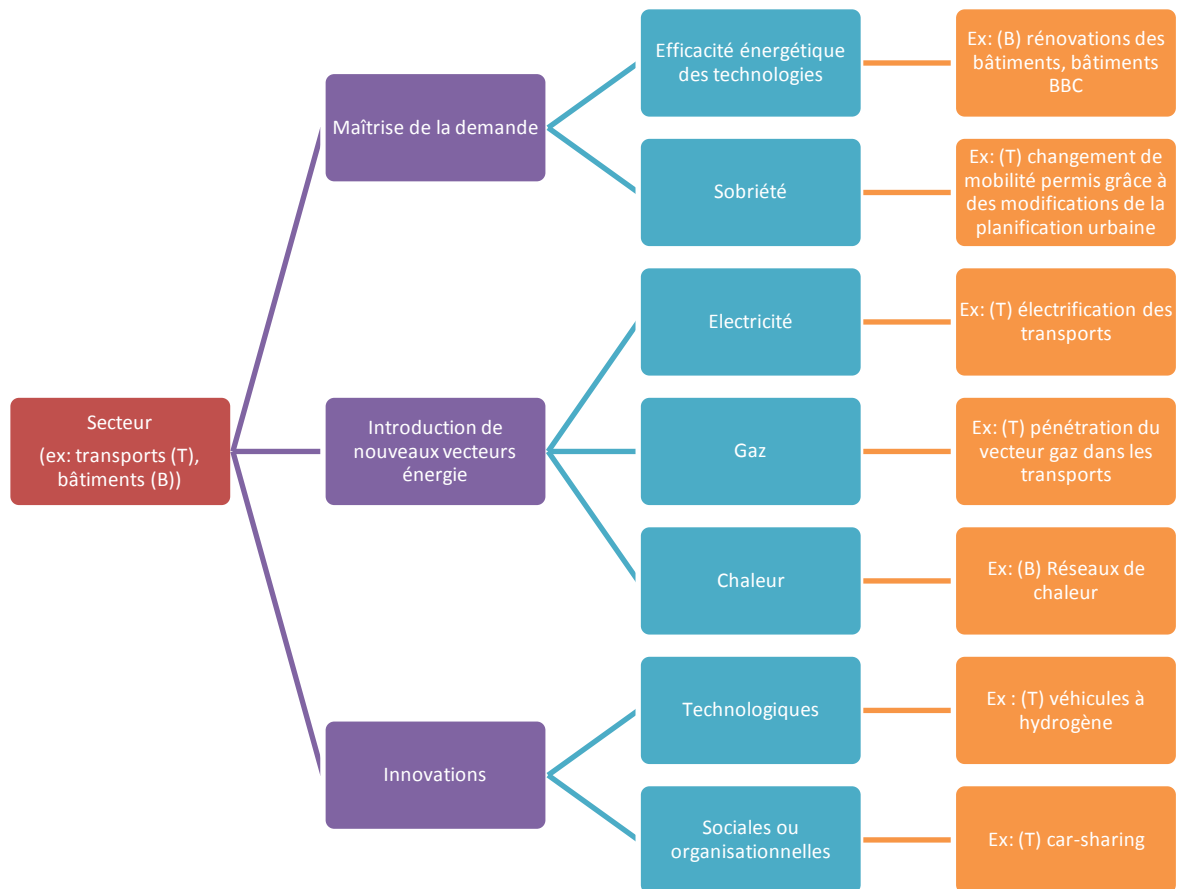
Aussi pour chacun de ces potentiels de changement, des leviers d'actions sont activés. Ces leviers d'actions peuvent être de différentes natures⁸ :

- Leviers *technico-économiques* qui utilisent le potentiel technique (rénovation des bâtiments, nouvelles technologies de véhicules plus efficaces, efficacité des appareils électriques, etc.)
- Leviers *sociaux* qui relèvent d'un choix de société et/ou d'un changement de comportements (endiguer l'étalement urbain, encourager les changements de mode de transport, réduire la vitesse sur les routes)

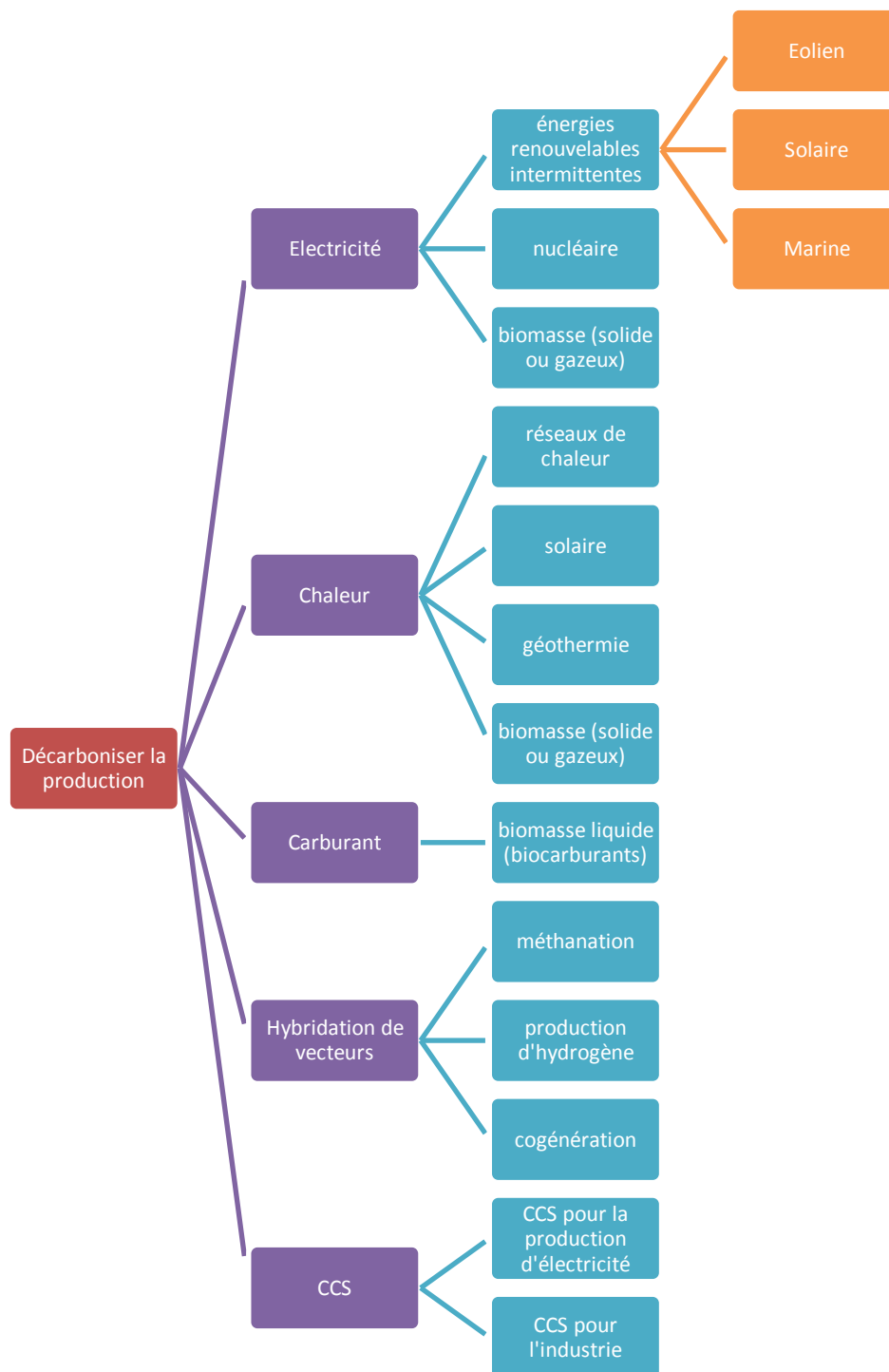
La Figure 2 et la Figure 3 donnent une représentation schématique des différents leviers d'actions mobilisés dans les scénarios. Cette représentation est très simplifiée car elle ne prend pas en compte les interactions entre ces leviers. Nous pouvons citer quelques exemples d'interdépendance entre ces leviers : l'éco-bâti s'accompagne de comportements sobres (pour avoir un impact positif, la rénovation du bâti ne doit pas s'accompagner de l'augmentation de la température intérieure), l'introduction de nouveaux vecteurs n'a de sens que si des mesures sont prises pour décarboniser la production, etc.

⁸ Pour les leviers d'action concernant la production, ces leviers relèvent essentiellement de la catégorie « technico-économique ».

Figure 2 Schéma représentant les différents leviers d'action en termes de maîtrise de la demande énergétique⁹, d'introduction de nouveaux vecteurs énergétiques et d'innovations (technologiques et sociales)



⁹ Dans cette étude nous ne nous intéresserons pas aux secteurs de l'industrie et des services car d'une part, la thématique était peu renseignée dans les scénarios, d'autre part, les enjeux principaux se situent sur les secteurs du bâtiment et des transports.

Figure 3 Schéma représentant les différents leviers d'action pour décarboniser la production¹⁰

Nous avons choisi de qualifier le rôle de ces leviers dans les scénarios que nous avons étudiés. Cette qualification se fait à travers trois critères. Le premier critère concerne l'importance de ce levier dans le scénario. En d'autres termes, il représente le poids du levier dans la structuration du changement. Par exemple, en Allemagne les énergies renouvelables jouent un rôle très « important » dans la

¹⁰ Pour la définition de méthanation, voir note 14.

stratégie de décarbonisation de la production d'électricité (les Allemands ayant fait le choix de sortir du nucléaire). Le deuxième critère s'intéresse davantage à la manière dont est renseigné le levier, c'est-à-dire le degré de précision apporté sur les conditions de réalisation, il intègre la notion de faisabilité. Ce critère est plus difficile à estimer, le degré de détail des scénarios étant très variable d'une composante à l'autre et d'un scénario à l'autre. Pour illustrer notre propos, nous pouvons prendre de nouveau en exemple le cas allemand. Le scénario allemand détaille de manière très précise le développement des énergies renouvelables électriques alors que peu d'éléments sont donnés quant aux mesures qui sont prises pour réduire la demande en énergie dans le secteur du bâtiment. Enfin, le troisième critère correspond à la notion de variabilité entre les scénarios/variantes/trajectoires d'un même pays. A titre d'exemple en France, la prise en compte du potentiel d'action donné par la sobriété est très variable selon les trajectoires du DNTE.

Pour résumer l'analyse sera établie au travers que quatre questions :

- Le scénario prend-il en compte ce levier d'action ?
- Celui-ci joue-t-il un rôle important dans la structuration du changement ? (Importance)
- A quel point est-il renseigné (degré de précision/quantité d'information apportée) ? (Précision)
- Varie-t-il dans les différentes variantes ? (Variabilité)

Nous utiliserons une échelle relativement simple afin de ne pas complexifier l'analyse et permettre une lecture plus facile des résultats :

0	x	xx	xxx
Ce critère n'est pas pris en compte dans le scénario	Peu	Moyennement	Beaucoup

Cette échelle doit permettre d'avoir une vision globale des degrés d'activation des leviers dans les scénarios¹¹. Elle constitue une sorte de « tableau de bord » du changement.

Il est important de faire remarquer à ce stade que l'analyse est qualitative. Dans la partie III nous présenterons les résultats sous forme d'un tableau et de commentaires. Ce tableau aura ce format (I= Importance, P=Précision, V=Variabilité):

¹¹ La notion de précision est relative. Pour ce critère, on étalonne l'échelle en fonction du scénario/trajectoire/variante qui a le degré de précision le plus élevé.

Figure 4 Exemple du tableau utilisé pour présenter les résultats de l'analyse comparative dans la partie III (I= Importance, P=Précision, V=Variabilité)

Secteur X	France				Royaume Uni				Allemagne			
Levier d'action Y		I	P	V		I	P	V		I	P	V
	Trajectoire 1				Scénario 1				Variante A			
	Trajectoire 2				Scénario 2				Variante B			
	Trajectoire 3				Scénario 3				Variante C			
	Trajectoire 4											
	<i>Commentaires</i>				<i>Commentaires</i>				<i>Commentaires</i>			

Pour terminer, ce cadre d'analyse nous permet de mieux qualifier les trajectoires envisagées par les pays au travers de leurs scénarios. Il nous permet par ailleurs d'identifier et de mieux cibler le besoin des pays en matière de politique européenne pour amorcer leur transition, et d'évaluer les défis qui pourraient se poser aux futures politiques européennes. Quelques points relatifs à ces questions seront ainsi soulevés dans la troisième partie.

2. Présentation des trois cas d'étude

Avant d'utiliser le cadre d'analyse, nous nous proposons de présenter plus en détail les trois exercices que nous avons déjà évoqués brièvement (le scénario phare allemand, les scénarios du *Carbon Plan* du Royaume Uni et les quatre trajectoires élaborées par le groupe d'experts lors du DNTE en France) et leur place au sein du processus politique.

2.1. Allemagne

2.1.1. Le tournant énergétique allemand a pris plusieurs virages depuis que l'Allemagne s'y est engagée

La politique énergétique allemande s'est depuis plus de quarante ans concentrée autour de la question du nucléaire, un conflit majeur qui a pris un tournant significatif sous le Gouvernement de Gerhart Schröder en 2002. Ce Gouvernement, issu de la coalition entre le Parti Social-Démocrate (SPD) et Les Verts, était arrivé au pouvoir avec le projet de tournant énergétique comportant quatre aspects : la réduction des émissions de GES ; l'amélioration de l'efficacité énergétique ; la substitution des énergies fossiles par les renouvelables ; une sortie du nucléaire échelonnée jusqu'en 2022.

En 2002, l'Atomgesetz de 1949 est amendée pour interdire la construction de nouvelles centrales nucléaires et limiter la durée de vie des centrales existantes à 32 ans (ce qui correspond à une sortie du nucléaire autour de 2024). Dès lors l'Allemagne s'engage dans la voie de sortie du nucléaire, considérant cette technologie à trop haut risque pour être durable¹². À cette même date a été mentionné pour la première fois l'objectif d'une réduction des émissions de GES de 40 % à l'horizon 2020. Puis cet objectif a été confirmé dans le Programme intégré de politique énergétique et de protection du climat (IEKP), comportant vingt-neuf lois et mesures complémentaires dans les secteurs de l'efficacité énergétique, du développement des énergies renouvelables et de la substitution des combustibles fossiles.

Avec l'arrivée au pouvoir de la coalition entre conservateurs (CDU) et libéraux (FDP) en 2009, les orientations de la politique énergétique sont remises en question. En effet, considérant le nucléaire comme une technologie de transition permettant l'atteinte des objectifs climatiques et le développement des énergies renouvelables à moindres coûts, le nouveau Gouvernement veut alors allonger la durée de vie des centrales nucléaires de 8 à 14 années (pour une sortie du nucléaire programmée à 2036). La décision est prise en 2010, en contrepartie de l'établissement d'une taxe sur le combustible nucléaire et de contributions volontaires des opérateurs électriques pour financer la transition énergétique. Cette réforme donnera naissance au « concept énergétique », l'Energiekonzept, dans lequel le gouvernement décrit les grandes orientations de la politique énergétique allemande.

Toutefois, l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima (Japon) en mars 2011 vient ébranler la décision du Gouvernement sur le report de la date de sortie du nucléaire. Le Gouvernement change alors de position et inscrit dans la loi la sortie du nucléaire en 2022 en amendant à nouveau

¹² <http://www.bmu.de/en/bmu/press-and-speeches/current-press-releases/detailansicht-en/artikel/new-atomic-energy-act-enters-into-force-1/>

l'Atomgesetz. La sortie du nucléaire accélérée implique une transformation rapide et profonde du système énergétique. Une série de mesures permettant le développement massif des énergies renouvelables et favorisant l'efficacité énergétique est promulguée durant l'été 2011.

Aujourd'hui le terme employé pour parler du tournant énergétique allemand est « l'Energiewende » (littéralement «Tournant de l'énergie») et repose sur l'ensemble des objectifs présents dans l'Energiekonzept (Federal Ministry for the Environment Nature conservation and nuclear safety, 2011) de septembre 2010 ainsi que la sortie du nucléaire en 2022 actée en 2011. Les objectifs de l'Energiekonzept sont présentés dans le tableau ci-contre. Les engagements phares sont la réduction en 2050 de 80% des émissions de GES par rapport au niveau de 1990 et un point de passage en 2020 de -40%. En termes de développement des énergies renouvelables, l'objectif est fixé à 80% dans la production d'électricité en 2050 (soit une augmentation de 60% par rapport à 2010) et à 60% dans la consommation finale d'énergie. Enfin, en ce qui concerne la maîtrise de la demande, la consommation d'énergie primaire devra être réduite de 50% et celle d'énergie finale de 40% par rapport aux niveaux de 1990.

Tableau 2 Objectifs de l'Energiekonzept (2010)

	Réduction GES (base 1990)	Développement des énergies renouvelables		Maîtrise de la demande (base 2008)		
		Part électricité	Part énergie finale	Energie primaire	Electricité	Chaleur bâtiments
2020	-50%	35%	18%	-20%	-10%	
2030	-55%	50%	30%			
2050	-80%	80%	60%	-50%	-25%	-80%

2.1.2. Le Leitstudie 2011-2012 : une trajectoire possible pour répondre aux objectifs de l'Energiewende

La mise en œuvre de l'Energiewende a été illustrée par un scénario publié en 2012, le Leitstudie 2011-2012 (Fraunhofer institute, 2012). Ce scénario reprend les objectifs de l'Energiewende et propose une trajectoire pour les atteindre.

2.1.2.1. Un scénario en backasting

L'objectif de ce scénario est de montrer qu'en prenant en compte les réalités sociales, économiques et politiques, une sortie du nucléaire accélérée est possible, et que le développement massif des énergies renouvelables et une meilleure maîtrise de la demande énergétique favorisent ce tournant énergétique. Ce scénario a été fait en backasting. Il donne une trajectoire possible pour répondre aux objectifs de l'Energiewende.

Plusieurs laboratoires spécialisés dans les sciences et techniques de l'énergie, et en particulier des énergies renouvelables, ont été chargés de réaliser ce scénario. Ainsi, plusieurs outils de modélisation, émanant de ces diverses consultations, ont été mobilisés pour réaliser ce scénario.

2.1.2.2. Trois variantes articulées autour du secteur des transports

Le scénario possède trois variantes qui diffèrent uniquement sur le secteur des transports. Ces variations portent sur le développement de différentes technologies dans ce secteur¹³ :

- Variante A = véhicules électriques + véhicules à hydrogène
- Variante B = véhicules électriques + véhicules fonctionnant à partir de gaz synthétique issu du processus de méthanation¹⁴
- Variante C = véhicules électriques

Dans les sous-sections suivantes nous allons décrire le scénario en nous intéressant plus particulièrement aux solutions qu'il apporte pour répondre aux enjeux de l'Energiewende.

2.1.2.3. La sortie du nucléaire et la sortie du charbon : un double défi

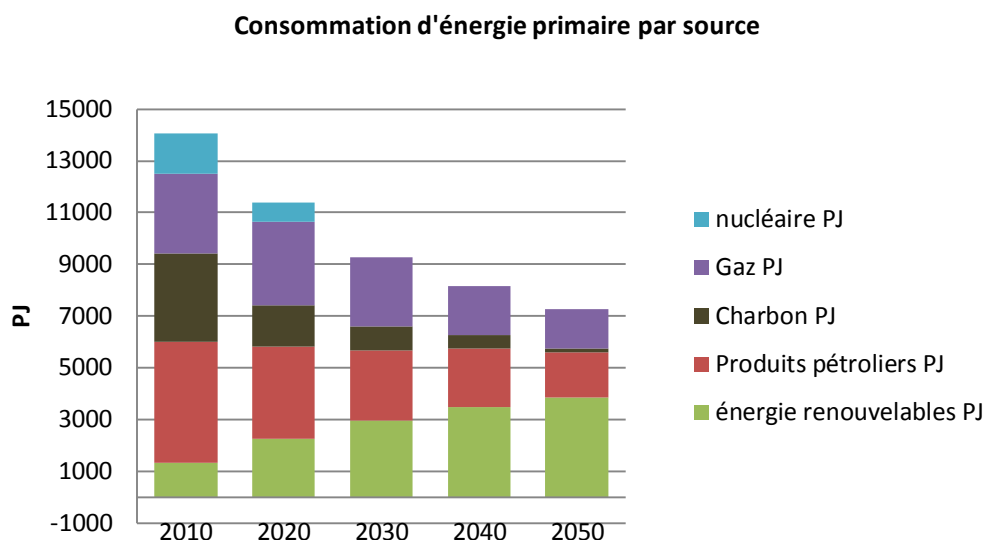
La sortie du nucléaire en 2022 couplée à la décarbonisation du mix énergétique¹⁵ est un double défi pour l'Allemagne. La Figure 5 permet de donner un aperçu de l'effort à mener sur la première décennie. En effet, la part du nucléaire (en bleu) s'élevait à 11% dans la consommation d'énergie primaire et à plus de 20% dans la production d'électricité en 2010. La sortie du nucléaire est également couplée à la réduction de 50% de la part du charbon (en marron) dans le mix d'énergie primaire entre 2010 et 2020. La sortie nucléaire/charbon en 2020 permet à elle seule d'atteindre l'objectif de réduction de la consommation d'énergie primaire de 20%. La réduction de l'utilisation de produits pétroliers (-25% en 2020 par rapport à 2010) et le développement des énergies renouvelables (+75% entre 2010 et 2020) permet d'amener la part des énergies renouvelables à 20% dans la consommation d'énergie primaire.

¹³ Ces variations sur le secteur des transports engendrent également des différences sur la production d'électricité car la méthanisation et la production d'hydrogène consomment plus d'électricité.

¹⁴ La méthanisation est le processus de production de gaz de synthèse (méthane).

¹⁵ Le mix énergétique, aussi appelé bouquet énergétique, est un terme utilisé dans le secteur de l'énergie pour parler de la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées.

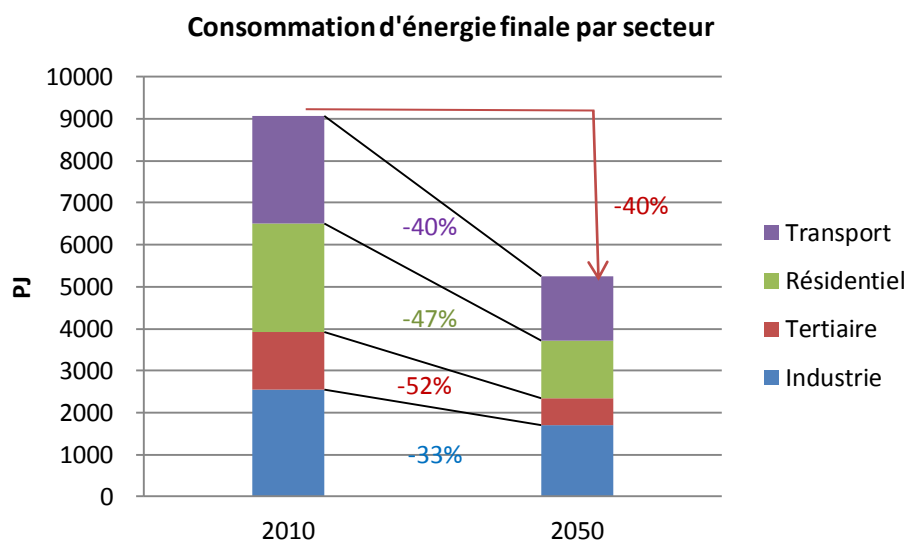
Figure 5 Graphique représentant l'évolution de la consommation d'énergie primaire de l'Allemagne de 2010 à 2050 en PJ¹⁶



2.1.2.4. Des objectifs ambitieux pour la maîtrise de la demande

Tous les secteurs sont mis à contribution pour réduire de 40% la consommation d'énergie finale (par rapport au niveau de 1990).

Figure 6 Graphique représentant la réduction de la consommation d'énergie finale par secteur entre 2010 et 2050



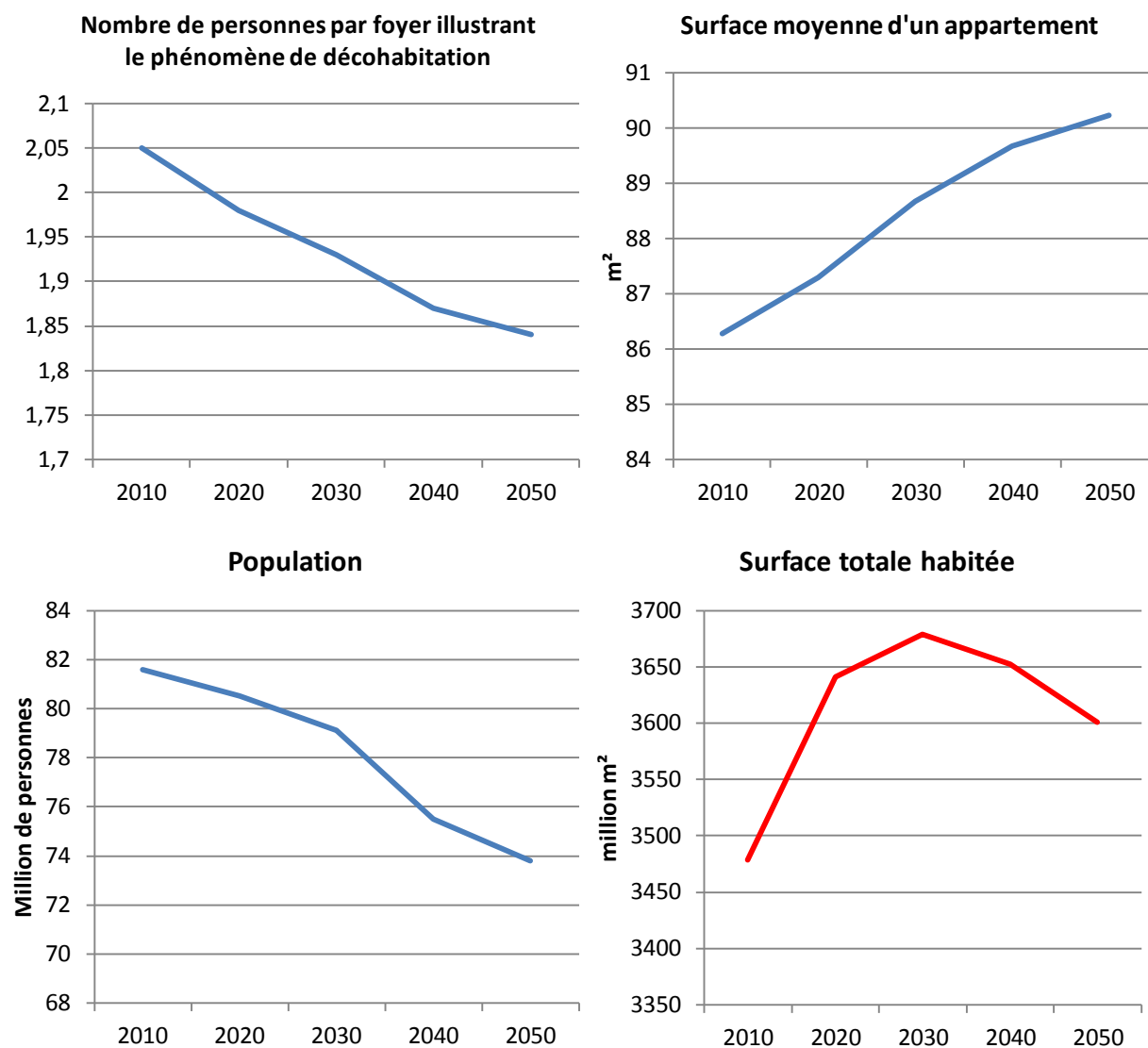
Ce sont les secteurs résidentiel et tertiaire qui sont davantage concernés avec une réduction environ -50% entre 2010 et 2050. Dans ces secteurs, la maîtrise de la demande est principalement portée sur l'amélioration de l'efficacité thermique des bâtiments et des technologies de chauffage. Il est ainsi mentionné que 2% des logements par an subissent des rénovations lourdes. D'autre part, les technologies de chauffage se diversifient et s'adaptent au mieux à l'usage. Elles sont généralement

¹⁶ 1 million de tonnes équivalent pétrole (Mtep) = 41,8 PJ.

délocalisées au niveau du besoin avec des technologies telles que le chauffe-eau solaire, la pompe à chaleur, le réseau de chaleur par récupération, etc.

Enfin, le phénomène de décohabitation¹⁷ couplé à une augmentation de la surface des appartements est également mis en évidence dans le scénario comme le montre la Figure 7.

Figure 7 Graphiques schématisant le phénomène de décohabitation

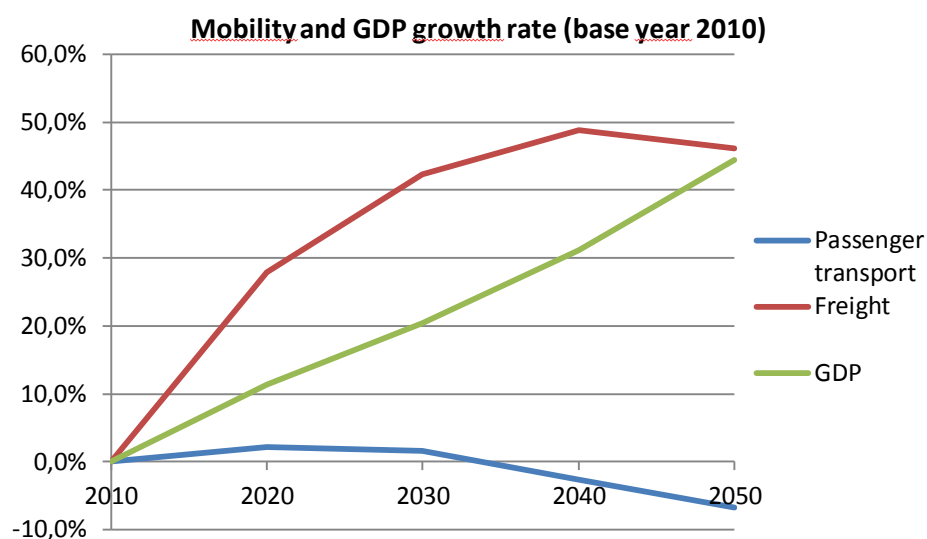


Ce phénomène a tendance à augmenter la demande en énergie car il augmente la surface totale habitée et donc à chauffer, éclairer, etc. Toutefois cette augmentation est compensée par une baisse de la démographie (-0,3% par an en moyenne sur la période 2010-2050) et par l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et technologies de chauffage citées précédemment.

¹⁷ Le phénomène de décohabitation s'est développé ces dernières années notamment avec le nombre croissant de divorce. En effet, les parents divorcés occupent souvent un logement plus grand que celui dont ils auraient besoin seuls pour pouvoir accueillir leurs enfants. Ce phénomène est loin d'être marginal et est à l'origine de l'accroissement de la surface habitée.

Par ailleurs, le secteur du transport contribue également largement à l'effort puisque la consommation du secteur est réduite de 40% entre 2010 et 2050. Cette réduction de la consommation est notamment permise par l'amélioration de l'efficacité des technologies conventionnelles et par l'introduction de nouvelles technologies comme les véhicules électriques dont les moteurs ont des rendements d'au moins 90% (contre 30% pour les moteurs thermiques classiques). D'autre part, la mobilité des personnes a tendance à baisser (Figure 8) et ce phénomène étant couplé à une baisse démographique, la consommation d'énergie du transport de personnes en est forcément affectée. Seule la mobilité des marchandises augmente (+45% en 2050 par rapport à 2010, augmentation due à la croissance économique en hausse comme le montre la Figure 8) mais cette augmentation est compensée par un changement du mode de transport allant du transport routier vers le transport fluvial et ferroviaire.

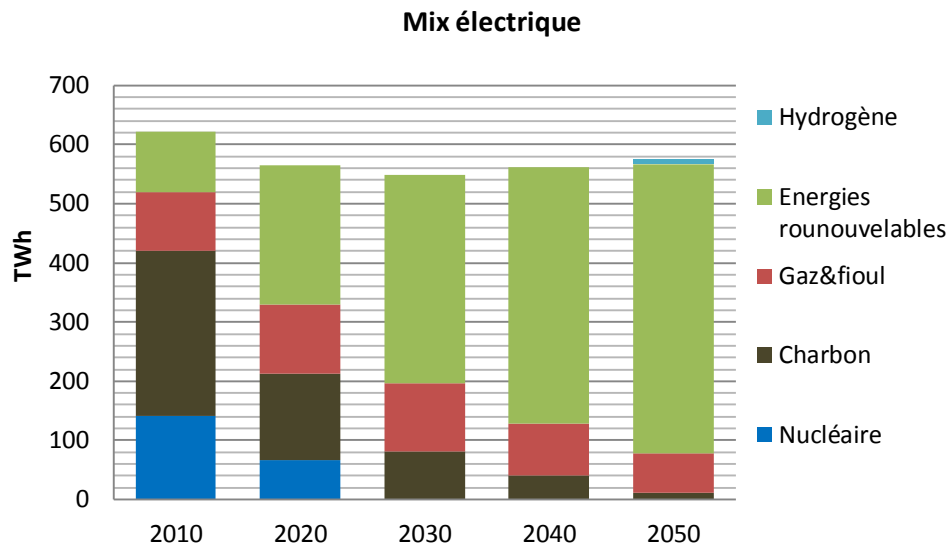
Figure 8 Evolution de la mobilité des personnes et des marchandises mise en regard avec la croissance économique



2.1.2.5. Une transformation profonde du système de production d'électricité

Comme nous l'avons vu précédemment, la sortie du nucléaire et du charbon est un véritable défi pour l'Allemagne. Les enjeux de ce défi sont principalement portés par le secteur électrique dont la part du charbon et du nucléaire dans la production électrique s'élevait respectivement en 2010 à 45% et 22,6% respectivement.

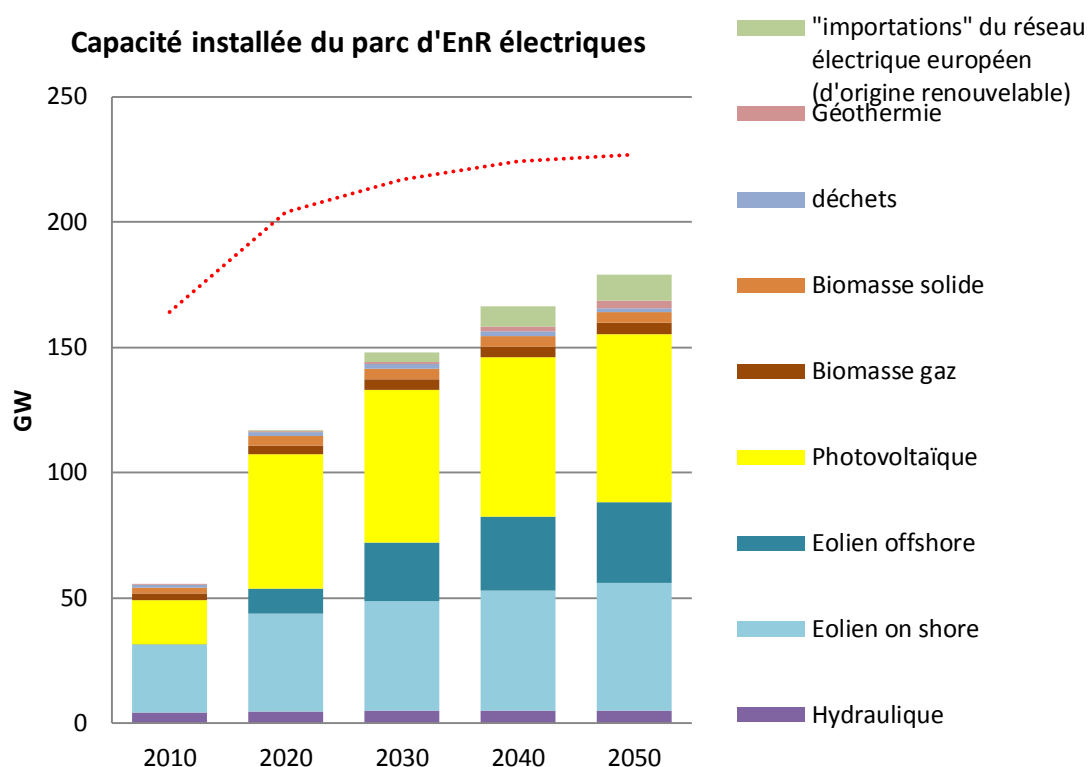
Figure 9 Evolution de la production d'électricité entre 2010 et 2050, scénario A



Pour répondre à cet enjeu, l'Energiekonzept prévoit un développement massif des énergies renouvelables. La Figure 10 montre l'évolution de la capacité installée nécessaire pour relever ce défi. Les principales sources d'énergies développées sont l'énergie éolienne et photovoltaïque. Ces énergies sont intermittentes¹⁸ ce qui explique d'une part la nécessité d'augmenter d'environ 40% la capacité installée totale entre 2010 et 2050 pour une production équivalente, et d'autre part, de diversifier les sources d'énergie (solaire, éolien) et de prendre en compte des échanges possibles avec d'autres pays européens frontaliers (ces échanges sont représentés sur le graphique dans la catégorie « importations du réseau électrique européen »).

¹⁸ On appelle énergies intermittentes les énergies disponibles naturellement mais dont la disponibilité est variable et fonction des conditions climatiques (soleil, vent, marée, etc.). Il est donc impossible de prévoir la disponibilité de ces énergies et donc à fortiori la production d'électricité associée. Cela pose deux problèmes majeurs : d'une part la stabilité du réseau électrique peut être perturbée et d'autre part, la production n'étant pas corrélée à la demande, la demande risque de rester parfois insatisfaite ou à l'inverse, la quantité d'électricité produite peut dépasser la demande.

Figure 10 Evolution de la capacité installée d'énergies renouvelables entre 2010 et 2050, scénario A



2.1.2.6. La diversification des sources de chaleur

Le besoin de chaleur diminue de près de 50% entre 2010 et 2050 dans le secteur du bâtiment. Cette baisse du besoin de chaleur est possible d'une part grâce à des rénovations thermiques des bâtiments qui sont estimées à hauteur de 2% de logements par an, et d'autre part, grâce à une diversification des sources de chaleur. Diversifier les sources de chaleur permet notamment d'utiliser la ressource au plus près de l'usage. Pour le chauffage, l'énergie solaire sera ainsi privilégiée au sud de l'Allemagne alors que nord on pourra davantage utiliser les ressources géothermiques ou de biomasse solide. En milieu urbain on préférera mutualiser la ressource en utilisant des réseaux de chaleur issue de cogénération¹⁹ fossile, biomasse ou encore de solaire thermique.

2.1.2.7. Un rôle important pour la biomasse et la cogénération

La cogénération joue un rôle important dans la transition. En effet elle est produite à partir de centrales à combustibles fossiles, ou biomasse, qui permettent de garder une certaine flexibilité sur la production, essentielle lorsque plus de 80% de la production d'électricité est issue de sources renouvelables intermittentes. D'autre part, elle est utilisée dans l'industrie à partir d'énergies fossiles qui sont progressivement remplacées par de la biomasse. Enfin, les unités de cogénération pour d'autres fins que l'industrie sont couplées à des réseaux de chaleur. Ces unités peuvent produire de l'énergie à grande échelle (pour les centrales à gaz ou biomasse) ou à petite échelle, c'est-à-dire au

¹⁹ La cogénération est la production de chaleur et d'électricité au sein d'un même processus. Les unités de cogénération fossiles sont des centrales thermiques à énergies fossiles (gaz ou charbon) qui sont utilisées pour produire de l'électricité et dont on récupère la chaleur issue de la combustion pour alimenter des industries ou des réseaux de chaleur urbains.

niveau d'un logement collectif. À titre indicatif en 2050 la cogénération représente environ 20% de la production d'électricité.

Par ailleurs la biomasse prend une place de plus en plus importante dans la production de chaleur (20% en 2050) et d'électricité (10% en 2050). Les biocarburants se développent également (plus de 50% des carburants en 2050).

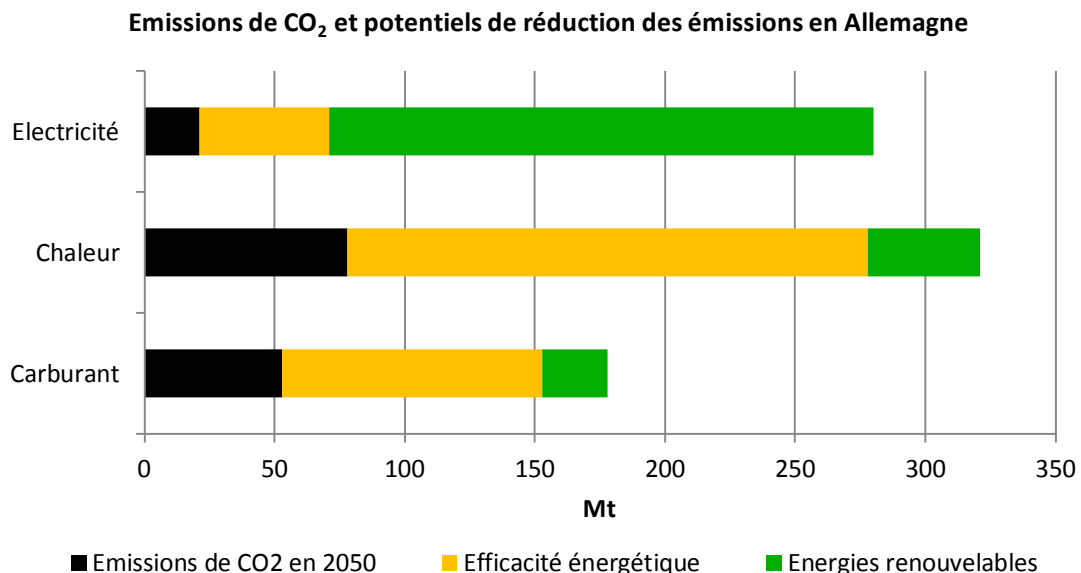
2.1.3. Conclusion

Pour conclure la décarbonisation du système énergétique allemand s'articule autour de deux leviers d'action:

- l'efficacité énergétique qui permet de réduire la demande en énergie
- les énergies renouvelables qui permettent de produire de l'énergie décarbonée.

La Figure 11 montre la contribution de ces deux leviers dans la décarbonisation du système énergétique sous ses différentes formes (électricité, chaleur et carburant). On peut y voir les émissions de l'Allemagne en 2050 dues au secteur énergétique et les émissions évitées par rapport à un scénario de référence grâce à l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. On peut remarquer que la décarbonisation de l'électricité se fait principalement grâce aux énergies renouvelables tandis que celle de la chaleur et des carburants s'articule principalement autour de l'efficacité énergétique.

Figure 11 Contribution des deux leviers efficacité énergétique et énergies renouvelables dans la décarbonisation du système énergétique sous ses trois formes (électricité, chaleur, carburant) (scénario A)



Si le scénario détaille de manière très fine le développement des énergies renouvelables, ce n'est pas le cas pour l'efficacité énergétique. Alors que l'Allemagne a clairement identifié l'efficacité énergétique comme un levier d'action majeur, les mesures prises pour atteindre les objectifs en matière d'efficacité énergétique ne sont pas toujours très clarifiées. C'est notamment le cas pour le secteur du bâtiment où les objectifs d'efficacité énergétique sont élevés (80% de réduction de la

consommation de chaleur dans le secteur du bâtiment) mais pour lequel le scénario ne détaille pas les mesures qui permettront de l'atteindre comme la rénovation des bâtiments par exemple.

2.2. Royaume Uni

2.2.1. Une transition pilotée par des « budgets carbone »

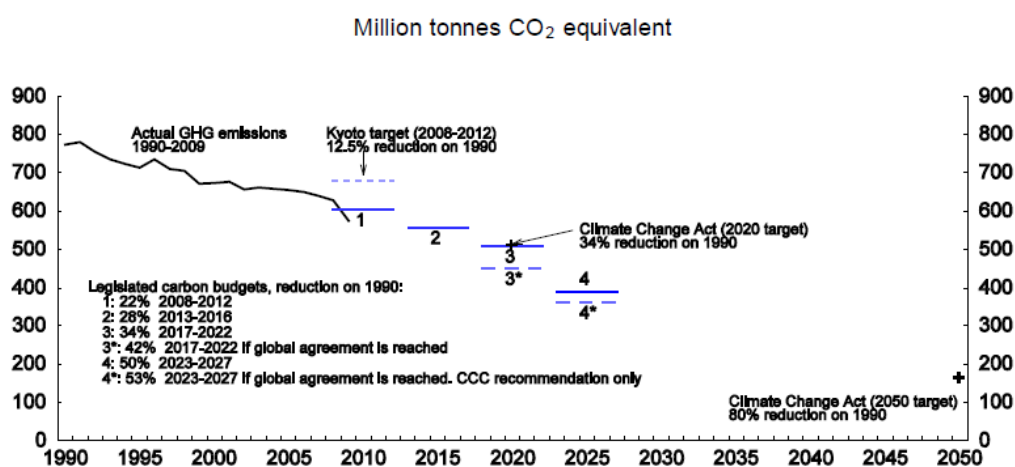
Dès 2000, le Royaume Uni mettait en place un Programme contre le Changement Climatique visant à réduire en 2010 les émissions de GES de 23 à 25 % par rapport au niveau de 1990, mais le véritable tournant dans la politique climatique anglaise a été donné par le *Climate Change Act* (CCA) en 2008. Le CCA est inscrit dans la loi et prévoit la constitution de budgets carbone d'une période de 5 ans correspondant à la quantité de CO₂ que le Royaume Uni est autorisé à émettre sur cette période. Ces budgets carbone sont constitués en fonction d'une trajectoire prédéterminée qui a pour objectif une réduction de 34 % en 2020 et de 80 % en 2050 par rapport au niveau de 1990.

Pour fixer ces budgets carbones, le *Climate Change Committee* (CCC), un comité regroupant des scientifiques reconnus dans leur domaine, est chargé selon le CCA de faire des recommandations de budget carbone au Parlement. Le Parlement vote ensuite les budgets carbone qui suivent plus ou moins les recommandations. Par exemple, pour la période 2008-2012, le Parlement a voté à l'identique les recommandations du CCC tandis que pour les périodes suivantes il a revu le montant des budgets à la baisse.

D'autre part, le CCA prévoit également d'impliquer le gouvernement dans le processus. Ce dernier doit en effet rédiger un Plan Climat dans lequel il décrit les mesures politiques qu'il souhaite prendre pour atteindre les objectifs de réduction des émissions fixés par le budget. Le dernier Plan Climat ou *Carbon Plan* (HM government, 2011), a été constitué en 2011 par le gouvernement de David Cameron nommé Premier Ministre en 2010.

Actuellement quatre budgets carbones ont été inscrits dans la loi, la figure ci-contre résume les objectifs de réduction des émissions du Royaume Uni.

Figure 12 Graphique représentant les émissions de GES du Royaume Uni entre 1990 et 2009, et les budgets carbones inscrits dans la loi. Source : DECC, 2010



Regards sur la mise en œuvre de la transition par des politiques ciblées : exemples du Green Deal, la Green Investment Bank et l'Electricity Market Reform

Le CCA permet d'établir un cadre solide pour la transition, toutefois sa mise en œuvre se fait par des politiques ciblées. Ces 5 dernières années de nombreuses politiques ont été mises en place. Nous nous proposons d'en détailler trois. La première mesure concerne l'établissement d'un instrument financier, la Green Investment Bank. Cette banque possède actuellement 3,8 milliards d'euros de fonds, provenant du secteur public et privé. Elle a pour objectif de financer des projets qui contribuent à tendre vers une économie « bas carbone ». 80% de son capital est réservé aux priorités qui ont été fixées par le Gouvernement (le développement de l'éolien Offshore, le recyclage et la production d'énergie à partir de déchets ainsi que l'efficacité énergétique). Elle est un instrument clé pour le Green Deal. Le Green Deal, également mis en place en 2012, est un mécanisme de paiement des mesures d'efficacité énergétique des bâtiments comme l'isolation, le double vitrage, l'achat de nouveaux systèmes de chauffage plus performants, etc. Il ne s'agit pas d'un prêt bancaire traditionnel car il n'est pas rattaché à la personne qui effectue le prêt mais à la propriété. Le remboursement du prêt se fait par les économies réalisées sur la facture énergétique. Une estimation préalable doit être faite pour s'assurer que les économies réalisées grâce aux travaux couvrent le montant du prêt (intérêts inclus).

En 2013, le Gouvernement a lancé une réforme du marché de l'électricité (Electricity Market Reform, 2013) afin de promouvoir les investissements dans les sources de production bas carbone. Cette réforme se décline en deux mesures phares :

- les mécanismes de capacité²⁰ pour répondre aux enjeux des intermittences de l'électricité renouvelable
- les Contracts for Difference (CfD). Ce mécanisme prévoit de fixer des tarifs de rachat²¹ de l'électricité produite de sources sobres en carbone. Ces tarifs sont négociés pour chaque technologie. En fonction du prix de marché de l'électricité, l'acheteur ou le vendeur doit reverser la différence de prix entre le tarif de rachat et celui du marché.

Ces CfD permettent d'assurer un tarif de rachat de l'électricité sobre en carbone. Le choix d'harmoniser les mécanismes de rachat en les incluant dans un même dispositif montre la volonté du Gouvernement de garder une orientation libérale de sa politique et « technologiquement neutre ». On peut toutefois se demander si ce mécanisme est réellement « technologiquement neutre » puisqu'il laisse une large marge de manœuvre au Gouvernement pour fixer les tarifs de rachat comme il le souhaite et ainsi favoriser le développement de certaines technologies.

Pour l'élaboration du rapport sur le Quatrième budget carbone (2023-2027), le CCC a produit en 2010 une série de scénarios que nous décrirons brièvement dans la partie suivante. En 2011, d'autres

²⁰ Avec ce mécanisme les fournisseurs d'électricité doivent justifier de leur capacité à satisfaire cette consommation de pointe, par l'acquisition de « garanties de capacité ». Ces garanties de capacité peuvent être acquises auprès des producteurs d'électricité ou bien auprès des opérateurs d'effacement de la pointe de consommation. Ce mécanisme permet d'avoir la capacité installée nécessaire pour assurer l'approvisionnement en électricité, notamment pour pallier aux problèmes des intermittences.

²¹ Ce mécanisme remplace les anciens « Renewables Obligation Certificates » qui obligeaient les fournisseurs d'électricité à acheter une partie de l'électricité qu'ils vendent à des producteurs d'électricité renouvelable.

exercices de modélisation ont été menés par le ministère de l'environnement (DECC²²) aboutissant à une série de trois scénarios exposés dans le *Carbon Plan*.

2.2.2. Les scénarios du Climate Change Committee et les « 2050 Pathways » de la DECC

Dans son rapport sur le quatrième budget (CCC, 2010), le CCC propose une analyse poussée de plusieurs options de réduction des émissions et modélise ces options afin d'identifier les trajectoires « coûts-efficaces²³ » pour chacune de ces options. Les options correspondent à des niveaux de réduction d'émissions différents.

Ces scénarios couvrent l'ensemble de la période couverte par le *Climate Change Act* car selon eux, les recommandations pour 2020 ne peuvent pas être faites sans considérer la trajectoire globale, c'est-à-dire jusqu'en 2050. Deux objectifs 2050 ont été choisis pour la modélisation : 90 % et 95 % de réduction des émissions de CO₂ par rapport au niveau de 1990²⁴. Pour chaque objectif, deux exercices de modélisations ont été menés : l'un considère qu'aucune mesure supplémentaire n'est mise en place pour atteindre l'objectif et l'autre, au contraire, prend en compte des mesures supplémentaires. Un modèle d'optimisation est ensuite utilisé pour déterminer la trajectoire coût efficace optimale dans chacun des quatre cas.

Le Gouvernement s'est inspiré de ces exercices de modélisation pour élaborer son Carbon Plan dans lequel il détaille les mesures à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs fixés par les Carbon Budgets.

En effet, dans un premier temps le Gouvernement a choisi de reprendre le modèle d'optimisation MARKAL utilisé par le CCC et de le modifier conformément à ses orientations politiques. Ces modifications sont de différentes natures. Elles sont citées comme suit dans le rapport officiel sans plus de précisions:

- *Elles concernent les coûts et contraintes liés au système de production d'électricité, et le Gouvernement a en particulier supprimé certaines technologies du panel et en a ajouté d'autres*
- *La demande en services énergétiques a été revue à la hausse*
- *Ces modifications portent également sur les coûts et la disponibilité de la bioénergie*

Il est intéressant de noter que ces changements tendent à augmenter le coût pour atteindre les objectifs. Les coûts d'investissement et de fonctionnement dans le secteur électrique ont été ainsi presque doublés. De même, l'augmentation de la demande en service contribue à l'augmentation globale des coûts puisque pour un même objectif de réduction, une demande en énergie plus grande doit être satisfaite.

²² Department of Energy and Climate Change.

²³ Une trajectoire coût efficace correspond à la trajectoire d'évolution de la société qui minimise les coûts.

²⁴ Si l'objectif officiel du Royaume Uni est de 80% de réduction des émissions de GES, cela revient à un objectif de réduction de 85% pour le CO₂ seul. Ces chiffres n'incluent pas les émissions dues au transport maritime et aérien international, le CCC estime qu'en incluant ces secteurs l'objectif devrait s'élever à 90%.

Dans un second temps, un exercice de modélisation a été confié à l'AEA²⁵, un bureau d'étude indépendant, et compte trente-six simulations. Ces simulations ont été réalisées à partir de différentes hypothèses sur les niveaux de demande énergétique, les prix des énergies fossiles, les objectifs et trajectoires de réduction des émissions, la disponibilité des technologies et ressources ainsi que la capacité des consommateurs à répondre aux variations des prix. Les résultats des simulations ont été analysés puis comparés avec d'autres scénarios créés par le simulateur de la DECC, le *2050 Pathways Calculator*, pour élaborer trois scénarios alternatifs que nous allons présenter ci-dessous.

Le *2050 Pathways Calculator* est un outil de simulation créé par la DECC pour sa propre utilisation mais également pour le grand public²⁶. Il ne présente pas d'algorithme d'optimisation et est ainsi utilisé à titre illustratif. L'utilisateur peut régler un ensemble de critères sur un niveau de 1 à 4 (où le niveau 4 est un niveau fortement ambitieux) et décrire une image du futur en 2050. Un moteur de calcul dirigé par les coûts calcule ensuite une trajectoire possible pour atteindre l'image du futur calibrée par l'utilisateur.

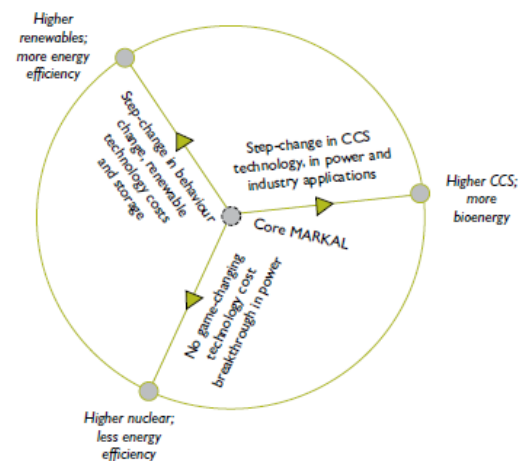
Ces trois scénarios alternatifs représentent trois trajectoires possibles pour atteindre les objectifs du Royaume Uni et correspondent à trois développements technologiques possibles considérant que le déploiement des options technologiques peut être freiné par des problèmes d'ordre économique (coûts de développement trop élevé), social (des problèmes d'acceptabilité du public) ou bien technique (impossibilité d'industrialiser le CCS²⁷ par exemple). Ces grandes options technologiques sont les énergies renouvelables (principalement pour la production d'électricité comme les éoliennes offshore ou énergies marines), le nucléaire et le CCS pour capter et stocker les émissions de CO₂.

Ces trajectoires ont été construites car plusieurs leviers de décarbonisation peuvent être activés pour réduire les émissions de GES. Chaque trajectoire s'articule autour de ces différents leviers, identifiés par le Gouvernement dans son Carbon Plan :

- La réduction de la consommation d'énergie
- La décarbonisation du mix électrique par des technologies sobres en carbone
- L'électrification de certains secteurs comme les transports
- L'utilisation de biomasse

Ainsi, les variables principales sur lesquelles diffèrent ces variantes sont les options technologiques décrites précédemment, l'efficacité énergétique et l'utilisation de biomasse. Ces variantes sont ainsi nommées:

Figure 13 Logique de construction des scénarios du Carbon Plan. Source : Carbon Plan, 2011



²⁵ Aujourd'hui le groupe se nomme Ricardo-AEA.

²⁶ Le simulateur est mis à disposition au grand public sur le site de la DECC : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/>

²⁷ Carbon Capture and Storage, il s'agit du stockage géologique du carbone. Dans les scénarios le CCS est utilisé pour capturer et stocker les émissions des centrales thermiques à énergies fossiles.

Tableau 3 Dénomination des trois scénarios du "Carbon Plan" britannique

Dénomination	Trajectoire
Nuclear	Low energy efficiency and high nuclear generation
CCS	High Carbon Capture & Storage (CCS) and additional Bio-energy
RES	High energy efficiency and higher renewables

2.2.3. Des leviers de décarbonisation différents pour les trois scénarios

Dans cette sous-section nous détaillerons les points qui différencient les trois scénarios qui portent sur les leviers de décarbonisation activés dans ces scénarios. Le Tableau 4 permet d'avoir un aperçu de ces principaux points.

Tableau 4 Principales différences entre les scénarios britanniques

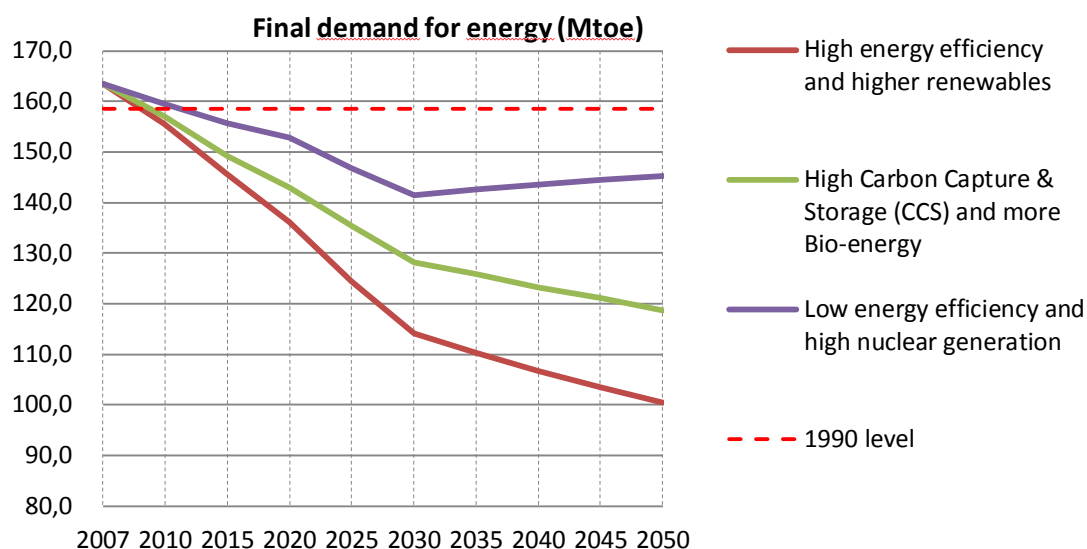
Leviers de décarbonisation		RES	CCS	Nuclear
Réduction de la demande énergétique		+++	++	+
Augmentation de la consommation d'électricité		++	+	+++
Option de décarbonisation du mix électrique ²⁸	Nucléaire	+	++	+++
	CCS	++	+++	+
	Energies renouvelables	+++	++	+
Utilisation de biomasse		+	+++	++
Quel degré de changement du système énergétique ?		+++	+	++

2.2.3.1. La maîtrise de la demande en énergie

Le premier levier est la réduction de la demande finale en énergie pour lequel on voit se dessiner clairement trois trajectoires différentes comme le montre le graphe ci-dessous.

²⁸ Comparaison des capacités installées

Figure 14 Evolution de la demande finale en énergie dans les trois scénarios. Source : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/>



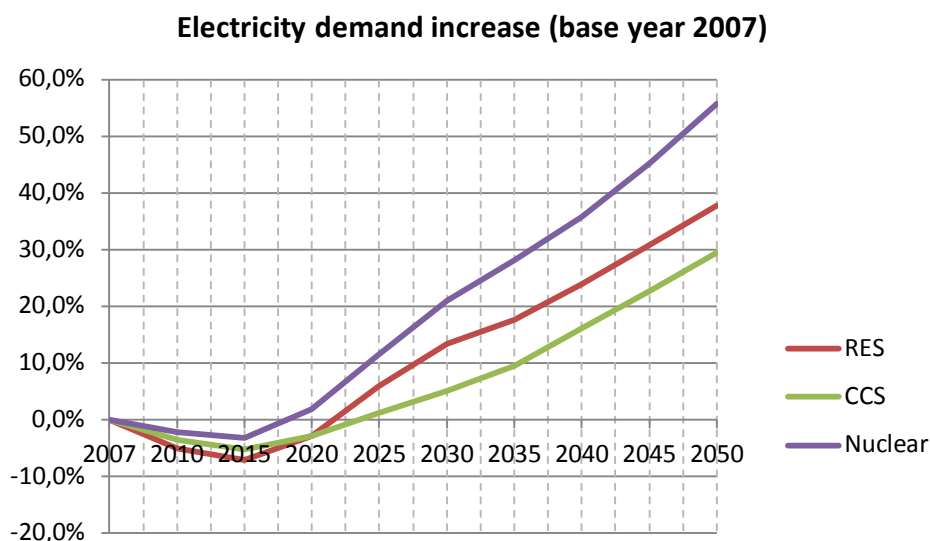
La réduction de la demande en énergie peut s'opérer par des mesures d'efficacité énergétique (rénovation des bâtiments, utilisation de techniques de chauffage plus efficaces, amélioration des moteurs des véhicules, etc.) ou par la sobriété (issue davantage de changement de comportement ou de choix de société comme la baisse de la température intérieure des maisons, la diminution de kilomètres parcourus par les particuliers, etc.). Dans ces trois trajectoires le secteur des transports est principalement concerné par la réduction de la consommation d'énergie (entre 60 et 45% de réduction par rapport à 2007). La différence la plus marquée entre les variantes se trouve au niveau du secteur du bâtiment (résidentiel/tertiaire) où l'effort de réduction varie de 2% pour la variante « nucléaire » à 45% pour la variante « RES ».

2.2.3.2. Le levier « électrification » couplé à la décarbonisation du mix électrique

La diversité dans l'articulation des leviers se retrouvent également dans le levier « électrification ». En effet, l'usage de l'électricité dans les différents secteurs permet de diminuer la consommation globale d'énergie : au sein du secteur des transports car les moteurs électriques ont un rendement qui avoisine 90 % alors que les moteurs thermiques ont des rendements plutôt proches des 30 % ; dans le secteur du bâtiment, puisque la pompe à chaleur, alimentée par une source électrique, permet de très bon rendements ; dans le secteur résidentiel, les plaques de cuisson électriques permettent d'obtenir de meilleurs rendements que les plaques à gaz.

La Figure 15 montre les trois évolutions envisagées de la consommation d'électricité qui varient entre 30 et 50%.

Figure 15 Evolution de la consommation d'électricité dans les trois variantes RES, CCS et Nuclear. Source : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/>



Si la consommation d'électricité augmente dans l'ensemble des scénarios, elle doit être associée à la décarbonisation du mix de production et cette décarbonisation peut se faire au travers des trois options technologiques mentionnées précédemment²⁹. La Figure 17 donne un aperçu de la composition du mix électrique en 2050 où nous retrouvons dans chaque scénario la technologie dominante : énergies renouvelables, CCS et énergie nucléaire. La Figure 16 montre l'évolution de l'intensité carbone où l'on peut voir que la production est presque totalement décarbonée en 2050, voire permet d'obtenir des crédits carbone négatifs pour le scénario CCS. En effet, le scénario CCS prévoit une forte utilisation de la biomasse et la moitié de l'électricité produite est issue du couplage énergies fossiles ou biomasse et CCS³⁰. La biomasse et le CCS permettent d'absorber le CO₂ et sont donc comptés négativement dans les bilans d'émissions. C'est pourquoi suivant cette trajectoire le secteur électrique deviendrait un « puits » de carbone.

²⁹ Le CCS est utilisé ici dans les centrales thermiques pour capter les émissions issues de la combustion des énergies fossiles ou de biomasse.

³⁰ Le CO₂ rejeté par l'utilisation énergétique de la biomasse est réabsorbé par les végétaux lors de leur croissance par le mécanisme de photosynthèse. La balance carbone de la biomasse est donc nulle.

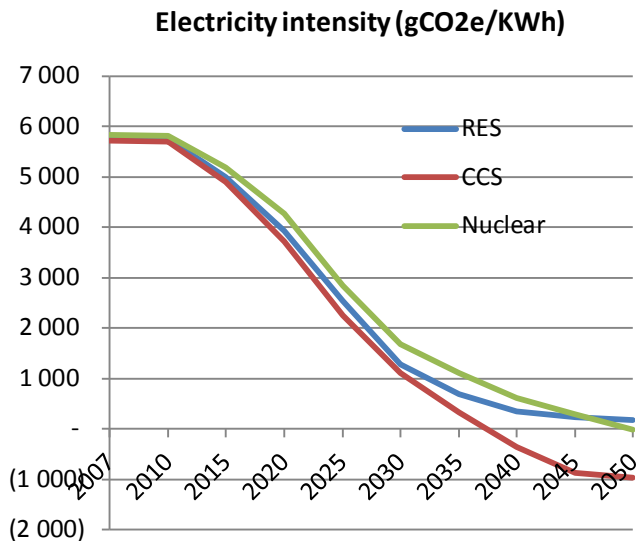


Figure 16 Contenu CO2 de l'électricité produite dans les trois scénarios. Source : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/>

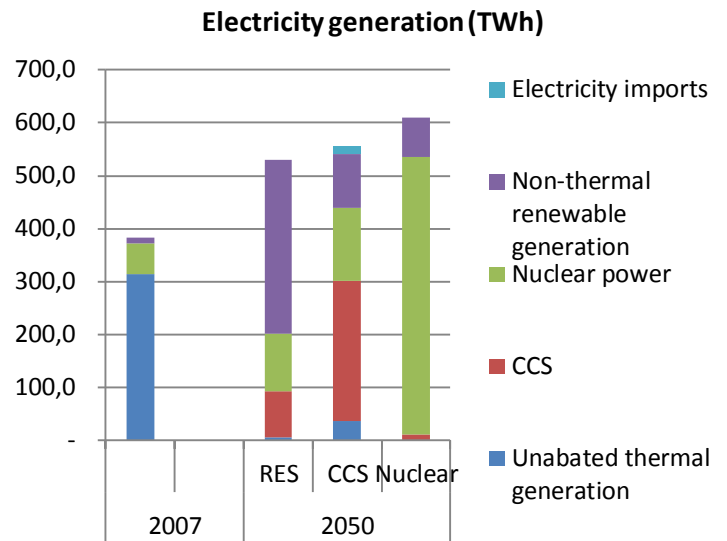
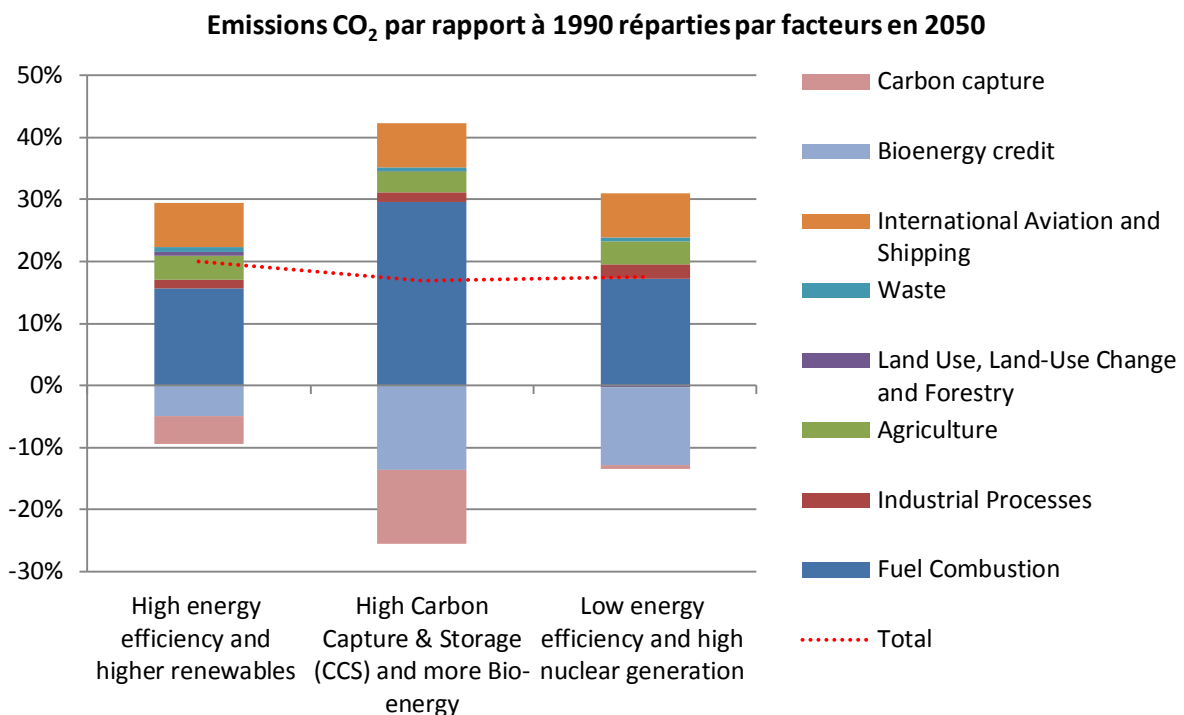


Figure 17 Composition du mix de production d'électricité en 2010 et en 2050 dans les trois scénarios RES, CCS et Nuclear. Source : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/>

2.2.3.3. La biomasse

Le dernier levier utilisé dans les scénarios est l'utilisation de biomasse en substitution des énergies fossiles. La Figure 18 Répartition des émissions CO2 par rapport à 1990 réparties par facteurs en 2050 dans les scénarios RES, CCS et Nuclear. La Figure 18 montre que le scénario CCS s'appuie lourdement sur l'usage de la biomasse (en rose) pour réduire les émissions de CO2.

Figure 18 Répartition des émissions CO2 par rapport à 1990 réparties par facteurs en 2050 dans les scénarios RES, CCS et Nuclear. Source : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/pathways/>



2.2.4. Conclusion

L'exercice de prospective proposé par le Royaume Uni dans son *Carbon Plan* est une approche qui diffère du cas d'étude précédent. En effet, contrairement à l'Allemagne, le Royaume Uni n'a pas encore fait de choix d'options technologiques de décarbonisation. La construction des scénarios autour des trois options technologiques traduit la position officielle³¹ du Gouvernement britannique qui est l'approche dite de « neutralité technologique ». Cette approche consiste à ne pas favoriser une technologie de décarbonisation plus qu'une autre en les mettant en concurrence sur un marché pour laisser les mécanismes de marché sélectionner la technologie la plus rentable économiquement. Un cadre juridique fort et des mesures complémentaires (par exemple, la réforme du marché électrique ou encore des mesures sur le prix du carbone) sont censés réguler ce marché pour assurer le développement des technologies sobres en carbone plus coûteuses que les technologies dites conventionnelles.

2.3. France

En 2012 lors de sa campagne pour l'élection présidentielle, François Hollande promet de réaliser un grand débat public sur la transition énergétique durant son mandat s'il est élu. Six mois plus tard, en novembre 2012, le Débat National sur la Transition Énergétique (DNTE) est lancé. Le DNTE se déroule après une longue série de débats nationaux (débat Souviron en 1995, le débat Besson en 2003 qui a abouti à la Loi POPE en 2005 ainsi qu'un débat sur le nucléaire 2006, le Grenelle en 2009). François Hollande se démarque de ses prédécesseurs d'une part, par le choix du sujet qui recouvre tous les aspects de la transition énergétique sans restriction³² et d'autre part, par le fait d'y impliquer l'ensemble des acteurs et le grand public.

2.3.1. Un débat pour dessiner l'avenir de la transition énergétique

« Pour engager pleinement le pays dans la transition énergétique, le débat doit faire émerger un projet de société autour de nouveaux modes de vie sobres et efficaces en énergie. », objectifs du débat énoncés selon le site officiel du DNTE³³. Le processus avait pour objectif de produire les bases d'une stratégie de transition énergétique pour le pays. Il devait en outre proposer des recommandations pour l'élaboration de la loi de programmation de la transition énergétique et *« construire un accord solide sur une trajectoire cohérente de transition énergétique conforme aux engagements »*, pour reprendre les termes officiels. La construction de cette trajectoire a été un enjeu du débat et a nécessité de mener une réflexion beaucoup plus large qu'un simple exercice de modélisation. Il s'agissait d'identifier les grandes lignes du modèle de société vers lequel la France souhaite se diriger. En tant qu'outil d'exploration du futur, les scénarios énergétiques ont eu un rôle important à jouer dans le débat. Un groupe d'experts a été constitué pour instruire la question des scénarios, afin de mobiliser les scénarios de manière effective et d'éclairer le débat notamment pour définir les leviers politiques et choix sociétaux majeurs qui permettent d'amorcer la transition.

³¹ Plusieurs acteurs interrogés ont insisté sur cette posture qui est également décrite dans le Carbon Plan.

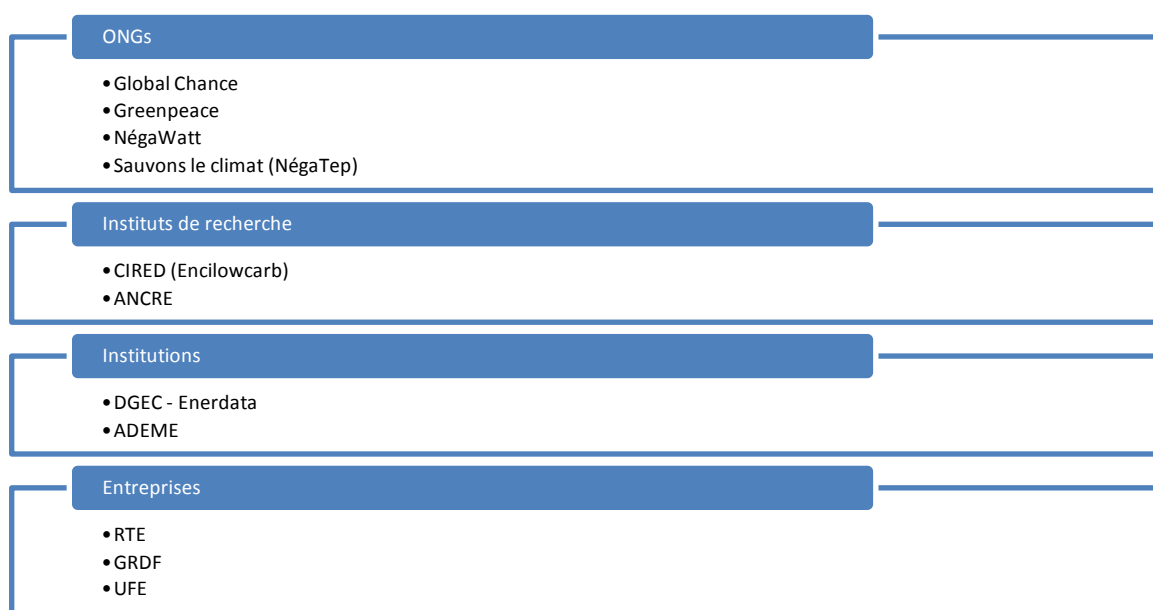
³² En 2009, la question du nucléaire avait été évincée du Grenelle afin de ne pas focaliser le débat sur un sujet qui divise les acteurs et de traiter des sujets plus variés comme l'érosion de la biodiversité, le changement climatique, la gouvernance de la transition, l'éducation à l'environnement, etc.

³³ <http://www.transition-energetique.gouv.fr/>

Ce groupe d'experts était notamment chargé de travailler étroitement avec deux des huit groupes de travail³⁴ en charge de l'élaboration d'une trajectoire de transition énergétique (GT2), et des thématiques de l'efficacité énergétique et sobriété (GT1).

2.3.2. Quatre trajectoires illustrent les futurs possibles et souhaitables du système énergétique français

La première difficulté rencontrée par le groupe d'experts a été l'absence d'un outil de modélisation du système énergétique français consensuel qui aurait permis de produire plusieurs scénarios cohérents et éclairer ainsi l'analyse. Les experts ont donc choisi de considérer tous les scénarios cohérents existants et suffisamment documentés. Onze exercices de scénarios énergétiques d'acteurs d'horizons très différents ont ainsi été retenus:



Il est intéressant de noter la diversité des scénarios sélectionnés. Les auteurs de scénarios ont été choisis parmi un panel d'acteurs diversifiés : entreprises, administration, ONGs, instituts de recherche, syndicat d'employeurs etc. Cette hétérogénéité implique de fortes disparités entre les modèles utilisés, les hypothèses structurantes choisies (PIB, évolution de la population, etc.), le message porté par les scénarios (visions mobilisatrices), le rôle donné au scénario par son auteur (appuyer un point de vue, explorer différentes trajectoires possibles, défendre des intérêts, etc.).

Le groupe d'experts a clairement montré sa volonté d'étudier tous les scénarios avec la même précision³⁵. Or, si l'étude approfondie de tous les scénarios sans distinction d'origine permet

³⁴ 8 groupes de travail réunissant l'ensemble des parties prenantes (État, entreprises, élus, syndicats, et ONG) et devant apporter un éclairage au débat sur une série de thématiques définies lors de la conférence environnementale, ont été constitués. Les thématiques traitées étaient les suivantes : thématiques de l'efficacité énergétique et sobriété (GT1), élaboration d'une trajectoire de transition énergétique (GT2), choix à faire en matière d'énergies renouvelables et de nouvelles technologies de l'énergie (GT3), financement de la transition énergétique (GT4), gouvernance (redéfinir le rôle de l'État et des collectivités) (GT5), emplois (GT6), compétitivité des entreprises (GT7), réseaux de distribution (GT8).

³⁵ Ce choix n'est pas anodin car on aurait pu également décider d'utiliser une analyse multicritères sous couvert « d'objectivité » et réduire ainsi le nombre de scénarios étudiés.

d'augmenter la richesse et la diversité des questions soulevées pour le débat, elle complexifie aussi grandement l'exercice d'analyse.

Le groupe d'experts a donc décidé de créer un *template*³⁶ dans lequel les données chiffrées des scénarios ont été regroupées et ordonnées. Ce fichier a été élaboré afin d'identifier et de mieux qualifier les modèles de société portés par chaque scénario. Pour cela plusieurs critères ont été retenus concernant :

- Les hypothèses structurantes exogènes : PIB, démographie, prix pétrole
- Les hypothèses permettant de qualifier les changements comportementaux et sociétaux : évolution de la mobilité, de la surface habitable, taille des ménages, etc.
- Les agrégats énergétiques par source et secteur (offre & demande) et hypothèses sur les transformations sectorielles
- D'autres indicateurs : GES, part ENR, etc.

Cette base de données a ensuite permis de confronter les scénarios. De cette confrontation sont ressorties quatre trajectoires illustratives représentant quatre modèles différents. Ces modèles sont inspirés de quatre scénarios existants :

Tableau 5 Dénomination des quatre trajectoires du DNTE

Dénomination	Trajectoire illustrée	Exemple de scénario
DEC	Décarbonisation par l'électricité	Negatep
DIV	Demande moyenne et diversification	ANCRE Div.
EFF	Efficacité énergétique et diversification	ADEME
SOB	Sobriété énergétique et sortie du nucléaire	Négawatt

Les trajectoires se différencient principalement sur trois critères : la maîtrise de la demande, la composition du mix énergétique et la prise en compte de la sobriété. Le Tableau 1 détaille la classification des scénarios en quatre trajectoires. Les croix représentent des niveaux différents allant du plus bas (+) au plus élevé (+++ ou ++++). Les trajectoires représentent quatre niveaux de demande en énergie. Les trajectoires DEC et SOB ont un mix énergétique peu diversifié (composé essentiellement de nucléaire pour DEC et d'énergies renouvelables pour SOB) contrairement aux deux autres trajectoires. Enfin un dernier critère de différenciation est la prise en compte de la sobriété qui n'est pas prise en compte par les trajectoires DEC et DIV, mais l'est par les trajectoires EFF et SOB. Pour cette dernière trajectoire, la sobriété a un rôle prépondérant dans la transition.

Tableau 6 Classification des quatre trajectoires du DNTE

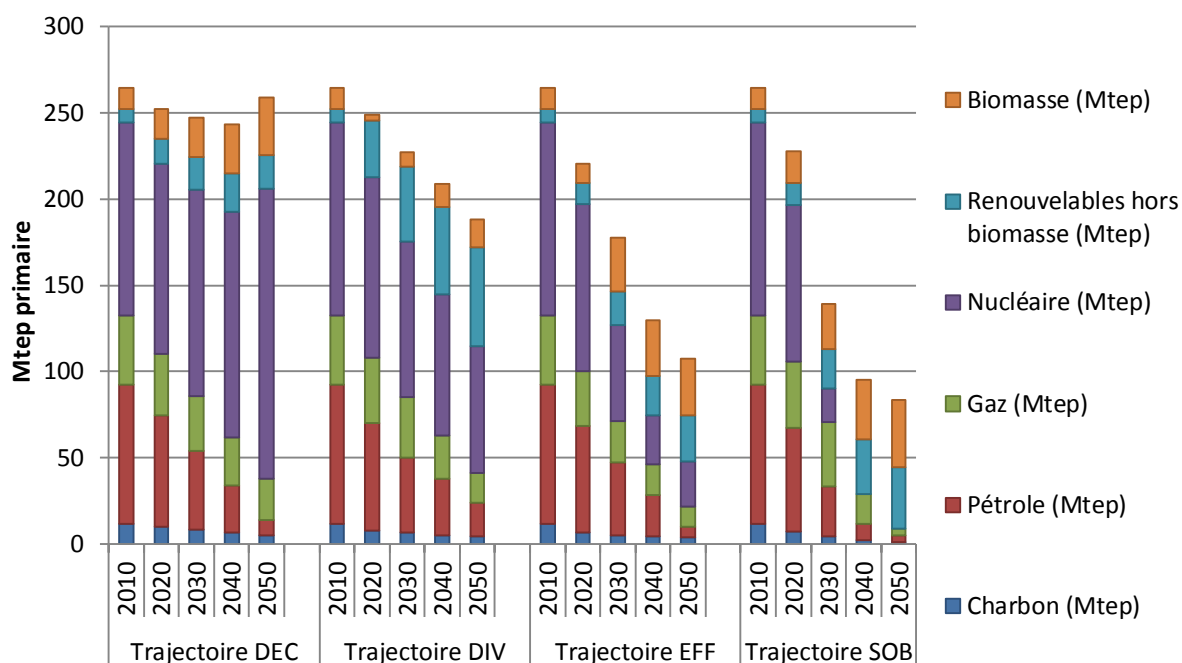
Critères de classification	Trajectoire DEC (type Négatep)	Trajectoire DIV (type ANCRE DIV)	Trajectoire EFF (type ADEME)	Trajectoire SOB (type Négawatt)
	Décarbonisation par l'électricité	Demande moyenne et diversification	Efficacité énergétique et diversification	Sobriété énergétique et sortie du nucléaire

³⁶ Il s'agit ici d'un fichier Excel qui regroupe et ordonne les données des scénarios afin de confronter ces scénarios sur une même base.

Maitrise de la demande	+	++	+++	++++
Diversification du mix énergétique	+ Nucléaire	+++ Diversifié	+++ Diversifié	+ ENR
Prise en compte de la sobriété	+	+	++	+++

La Figure 19 représente les consommations d'énergies primaires des quatre trajectoires et permet de visualiser les divergences entre les trajectoires mises en exergue par la classification du groupe d'experts. Nous proposerons l'interprétation de la classification du groupe d'experts donnée dans le Rapport du groupe de travail n°8 du DNTE (2013) dans les paragraphes suivants.

Figure 19 Evolution de la consommation d'énergie primaire entre 2010 et 2050 pour les 4 trajectoires. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013)



Maitrise de la demande et prise en compte de la sobriété:

Le premier critère de distinction des trajectoires est la maîtrise de la demande. Alors que la trajectoire DEC ne prévoit qu'une stabilisation de la demande, les trois autres trajectoires prévoient une réduction significative de la demande : DIV réduit la demande en énergie primaire de 30% en 2050 par rapport à 2010, EFF de 60% et SOB de 70%.

Dans la trajectoire DEC, les dynamiques structurelles qui sont à l'origine d'une augmentation de la demande en énergie depuis 20 ans se poursuivent : étalement urbain et décohabitation³⁷, développement des surfaces tertiaires, augmentation des trafics passagers et fret. La trajectoire DEC prévoit néanmoins une baisse de la consommation d'énergie dans le secteur des transports (-40% entre 2010 et 2050) et dans le secteur du bâtiment (-20%) qui sont principalement dues

³⁷ Voir note 17.

respectivement à des mesures de rénovation du parc de bâtiments existants et la pénétration massive de véhicules électriques. C'est une trajectoire qui envisage une électrification massive des besoins énergétiques. Son taux d'électrification, c'est-à-dire le rapport de la consommation d'électricité sur la consommation d'énergie finale totale, est largement plus élevé (d'environ 47%³⁸) que celui des autres trajectoires (proche de 34% pour DIV, EFF et SOB).

La trajectoire DIV se différencie de la trajectoire DEC par une meilleure exploitation du gisement efficacité énergétique.

Dans un contexte économique comparable à DEC ou DIV (croissance, production industrielle), la trajectoire EFF envisage une évolution différente de certains besoins structurels comme la stabilisation des surfaces tertiaires par employé, la moindre croissance du fret, des politiques urbaines permettant de maîtriser la croissance de la mobilité des personnes. Cette trajectoire se démarque également des deux premières par sa capacité à exploiter le potentiel d'efficacité énergétique, en particulier dans le secteur du bâtiment où les plans de rénovation du parc bâti sont ambitieux (500 000 logements/an, 50 % de gain moyen). Enfin, comme la trajectoire SOB, mais dans une moindre mesure, une partie de la maîtrise de la demande est due à des changements sociétaux, comme dans le secteur des transports où le développement des transports urbains et des nouvelles mobilités permettent une légère réduction de l'usage des véhicules particuliers.

La trajectoire SOB se démarque des autres principalement parce que la réduction de la consommation repose en partie sur la recherche d'une plus grande sobriété, individuelle mais aussi collective, dans les services énergétiques (allègement des véhicules et réduction des vitesses, biens durables, urbanisme...), développement du recyclage et de l'écologie industrielle, relocalisation des productions. Elle envisage une amélioration de l'efficacité énergétique par la diffusion de technologies plus efficaces et en particulier dans le secteur du bâtiment pour lequel elle prévoit un ambitieux plan de rénovation des bâtiments (750 000 logements par an, objectif de performance énergétique proche de celle des bâtiments labellisés BBC³⁹).

Diversification du mix énergétique :

La Figure 19 nous permet de visualiser la différence de mix énergétique envisagé par les quatre trajectoires. La trajectoire DEC a un mix énergétique composé majoritairement de nucléaire (65% de la consommation d'énergie primaire totale) qui est la technologie dominante de sa production électrique⁴⁰. A l'inverse, les trajectoires DIV et EFF ont des mix énergétiques plus diversifiés que les deux autres trajectoires qui sont composées d'énergies renouvelables intermittentes (DIV : 30% et EFF : 25% en 2050), de nucléaire (DIV : 40% et EFF : 25%), de biomasse (DIV : 8% et EFF : 30% en 2050), et énergie fossiles (environ 20% pour les deux trajectoires). Enfin la trajectoire SOB a un mix « peu » diversifié car il est composé essentiellement d'énergies renouvelables intermittentes (43% en 2050) et de biomasse (45% en 2050), le nucléaire étant abandonné dans la décennie 2030.

Toutefois cette question de diversification du mix énergétique ne doit pas être découplée de celle de la maîtrise de la demande car le niveau de demande en énergie pose de véritables enjeux de mise en œuvre. Par exemple, le niveau de demande est bien plus élevé dans la trajectoire DIV que la

³⁸ En 2010, le taux d'électrification était de 24%.

³⁹ Bâtiment Basse Consommation.

⁴⁰ Rappelons que la trajectoire DEC prévoit une électrification massive de ses besoins énergétiques.

trajectoire SOB. Si le pourcentage d'énergies renouvelables est beaucoup plus élevé pour la trajectoire SOB, la quantité absolue d'énergie renouvelable consommée est légèrement plus élevée dans DIV que dans SOB. Ainsi, les défis de mise en œuvre liés à la production d'énergie renouvelable seront de même ordre dans les deux trajectoires. Par ailleurs, pour répondre à la demande en électricité, la trajectoire DEC prévoit d'une part, de remplacer le parc de centrales (composés actuellement d'une cinquantaine de réacteurs), et d'autre part d'en construire de nouvelles pour augmenter de 26% sa capacité installée d'énergie nucléaire entre 2010 et 2050.

2.3.3. Toutes les trajectoires ne respectent pas les engagements climatiques et énergétiques de la France

Les engagements les plus significatifs en matière de climat et d'énergie ont été inscrits dans la loi POPE (Programme d'Orientation de la Politique Énergétique) du 13 juillet 2005. Il s'agit d'une part, de l'inscription formelle du *Facteur 4*⁴¹ (diviser par 4 des émissions de GES de la France entre 1990 et 2050) dans la loi et qui se traduit par une baisse de 3% par an des émissions de GES ; et d'autre part, la loi POPE prévoit de maîtriser la demande en énergie et s'exprime par la réduction de l'intensité énergétique de 2% par an dès 2015 et 2,5% d'ici à 2030. Enfin François Hollande a confirmé sa promesse de campagne et s'est engagé à réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50% d'ici 2025.

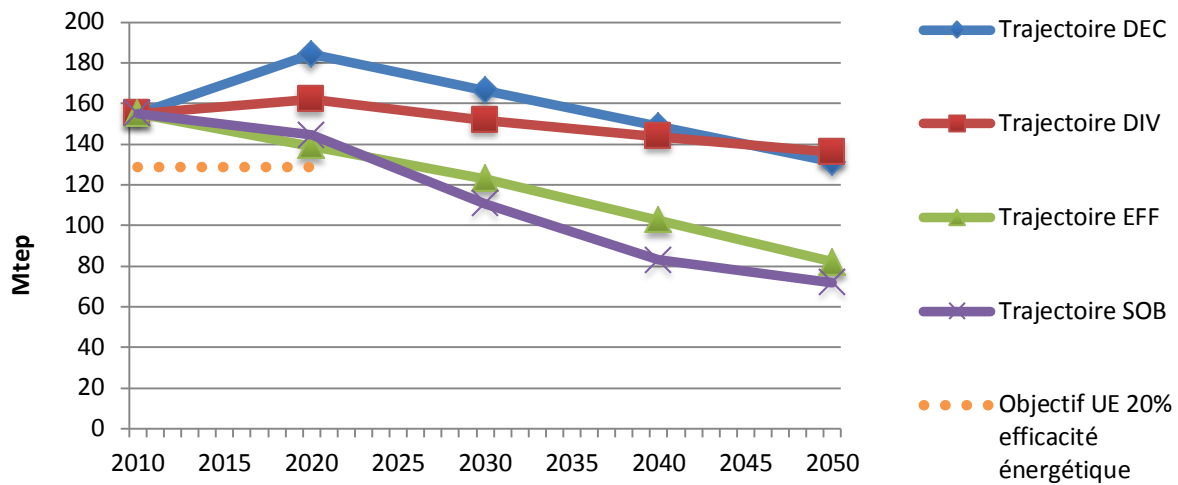
Par ailleurs, la France est engagée vis-à-vis de l'Europe en matière de réduction des émissions de GES et d'énergies renouvelables. Elle doit en effet réduire de 14% ses émissions de GES en 2020 par rapport à 2005 et augmenter sa part d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale à 23% en 2020. L'objectif d'efficacité énergétique européen n'est pas contraignant mais la France a choisi de le suivre et de réduire entre 19,7 et 21,4% sa consommation d'énergie finale (par rapport à un scénario de référence ou BAU⁴²).

Si toutes les trajectoires réussissent à diviser par quatre les émissions de CO₂, seules les trajectoires SOB et EFF atteignent un facteur 4 sur l'ensemble des GES en 2050. D'autre part, l'objectif d'efficacité énergétique n'est atteint en 2020 par aucune des trajectoires comme le montre la Figure 20.

⁴¹ Jacques Chirac avait prononcé la première fois cet engagement en 2003 devant la scène internationale.

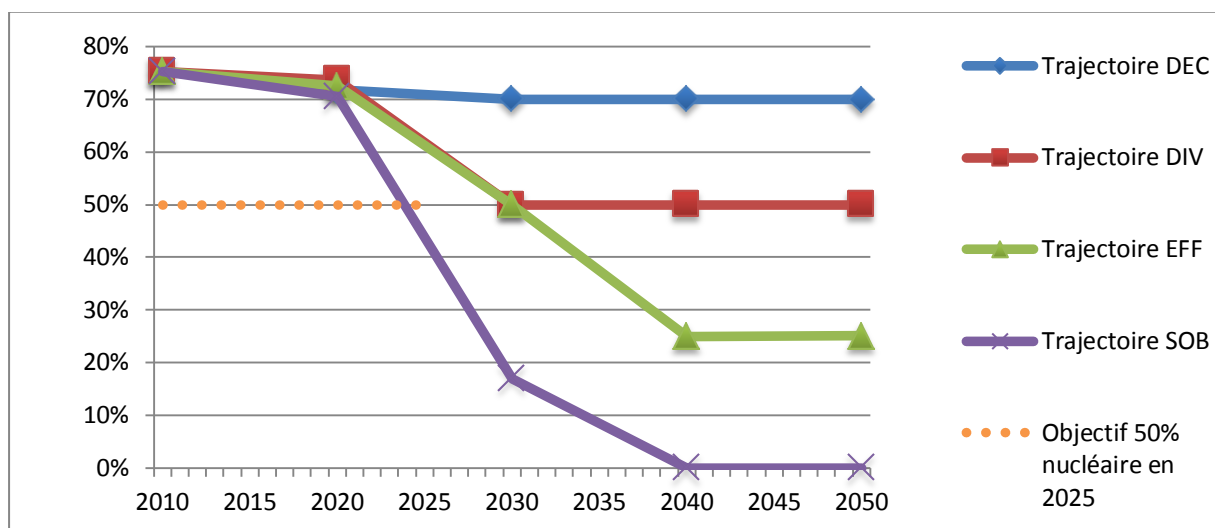
⁴² Les scénarios appelés BAU (Business As Usual) représentent des prolongations de tendances, c'est à dire une trajectoire possible si aucune mesure n'est prise pour amorcer un changement.

Figure 20 Consommation d'énergie finale et objectif efficacité énergétique de la France. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013)



Les scénarios ne montrent pas de point de passage pour 2025 (pas de temps de 10 ans), on ne peut donc pas savoir s'ils respectent l'objectif «Nucléaire réduit à 50 %». Toutefois nous pouvons considérer de manière approximative que les trajectoires DIV et EFF s'en rapprochent et que la trajectoire SOB l'atteint sans difficulté comme le montre la Figure 21.

Figure 21 Part du nucléaire dans le mix électrique et objectif 50% de François Hollande. Source : Rapport du GT2 (Criqui & al., 2013)



2.3.4. Conclusion

La France se détache des deux autres cas d'étude par son choix d'engager un débat public sur la transition énergétique. Le travail des experts sur les scénarios a eu un rôle important. Comme l'écrit Mermet « dans le domaine du débat public et de la décision, les acteurs s'adonnent presque toujours spontanément à des spéculations sur le futur, la prospective revient à un travail d'explicitation, d'approfondissement de critique de ces réflexions et de ces discussions » (Laurent Mermet & al., 2003). Dans le DNTE, l'exercice de comparaison des scénarios a en effet permis de mettre en discussion les leviers d'action mobilisés par les porteurs de scénarios et comprendre la place et rôle dans le changement qui leur étaient attribués. Cette « déconstruction » des mécanismes utilisés dans

les scénarios a notamment donné un cadrage nouveau au débat et fait émergé de nouveaux enjeux pour la transition énergétique française. Deux points ont particulièrement été mis en débat:

- La sobriété a été identifiée comme un potentiel d'action significatif et a permis de poser de véritables questions en termes de choix de modèles de société
- Le niveau de demande en énergie conditionne la mise en œuvre de la transition (cf. l'exemple sur les centrales nucléaires de la trajectoire DEC), donc il y a de véritables enjeux en matière de maîtrise de la demande

Toutefois ce travail de comparaison ne nous renseigne pas sur la vision de la France a proprement parlé puisqu'aucune trajectoire n'a été « sélectionnée ». Le débat est resté ouvert sur le sujet car les choix politiques n'ont pas encore été formulés.

2.4.Des approches différentes

Comme nous l'avons vu dans la partie 1, une première étape de l'analyse consiste à identifier les méthodes de prospective utilisées par les pays pour élaborer leurs scénarios. Le Tableau 7 reprend les éléments mobilisés dans cette analyse.

Tableau 7 Eléments mobilisés pour analyser la méthode de prospective utilisée par les pays (formats, variations entre variantes/scénarios/trajectoires, types de scénario, et modèles utilisés)

	Royaume Uni	Allemagne	France
Format	3 scénarios	1 scénario – 3 variantes	4 trajectoires contrastées
Variations entre variantes - scénarios - trajectoires	+++ Scénarios contrastés	+	++++ Scénarios très contrastés
Principaux thèmes de variation entre les variantes	Orientations technologiques du secteur électrique Réduction de la demande Electrification Usage de la biomasse	Orientations technologiques du secteur des transports	Réduction de la demande par l'efficacité et la sobriété Orientations technologiques du secteur électrique Niveau d'électrification des besoins énergétiques
Typologie de scénario	Normatif	Normatif	Normatif/Exploratoire
Modèles	Modèle d'optimisation + simulateur drivé par les coûts	Backasting – consortium de laboratoires	Définition de 4 trajectoires à partir de scénarios existants issus de modèles de tous types
Interprétation de la situation	Cadre juridique solide et structuration du changement par les mécanismes de marché	Choix technologiques et structuration du changement autour de ces choix technologiques	Choix politiques à faire en matière de technologies et d'objectifs de maîtrise de la demande

Ce tableau permet de mettre en exergue les différences d'approches entre les pays. En effet, l'Allemagne utilise un scénario phare dont les variantes portent uniquement sur le secteur des transports. La trajectoire semble donc balisée par les objectifs de l'Energiewende, et les incertitudes concernant les leviers d'action mobilisés dans la trajectoire se concentrent sur le secteur des transports. A l'inverse, les trois scénarios anglais contrastés montrent plus de zones d'incertitudes, que ce soit sur les technologies de décarbonisation du secteur électrique, sur la maîtrise de la demande, sur l'électrification des besoins énergétiques ou encore sur le rôle de la biomasse dans la transition. Par ailleurs, le choix de structurer les trois scénarios en fonction du développement des technologies de décarbonisation (énergies renouvelables, nucléaire et CCS) reflète la position officielle du Gouvernement britannique qui est l'approche dite de « neutralité technologique » mentionnée précédemment. Enfin, la France propose quatre trajectoires contrastées qui portent quatre modèles de société différents. Les principales divergences se concentrent autour de la maîtrise de la demande et des choix de technologies de décarbonisation (nucléaire, énergies renouvelables, biomasse).

De plus, la typologie de Börjeson nous permet d'interpréter le choix des modèles et techniques de scénarisations utilisés par les scénarios britanniques et allemands. En effet, Börjeson nous dit que l'utilisation de modèles d'optimisation (comme au Royaume Uni) traduit une préférence pour minimiser les coûts sur le court terme, plutôt que de choisir des options qui seraient plus coûteuses sur le court terme mais assureraient l'atteinte d'objectifs à long terme. A l'inverse l'utilisation de techniques en backcasting (trajectoire construite à partir du point d'arrivée) comme en Allemagne montre une volonté de privilégier l'atteinte des objectifs de long terme, quitte à augmenter les coûts sur le court terme (Börjeson *et al.*, 2006).

Enfin pour conclure cette partie nous pouvons interpréter brièvement les situations dans chacun des trois pays:

- Le Royaume Uni a établi un cadre juridique solide dans lequel se structure la transition et où les mécanismes de marché ont un rôle prépondérant
- L'Allemagne a fixé des objectifs politiques et a fait des choix technologiques qui structurent sa transition
- La France a ouvert le débat et n'a pas encore fait de choix politiques qui pourront amorcer le changement

3. Utiliser les résultats de l'analyse comparative des scénarios pour alimenter la discussion européenne : cas du secteur électrique et des transports

Après la présentation de ces trois cas d'étude, nous abordons dans la troisième partie la question européenne. Dans un premier temps, nous donnerons un rapide aperçu de la politique européenne de l'énergie et du climat actuelle et les enjeux de la politique européenne future. Dans un second temps, nous relèverons les principaux défis de la politique européenne que nous avons pu identifier à partir des résultats de l'analyse comparative. Nous détaillerons cette réflexion pour deux secteurs clés de la politique européenne : le secteur des transports et le secteur électrique.

3.1. Eléments clés de la politique énergétique et climatique européenne

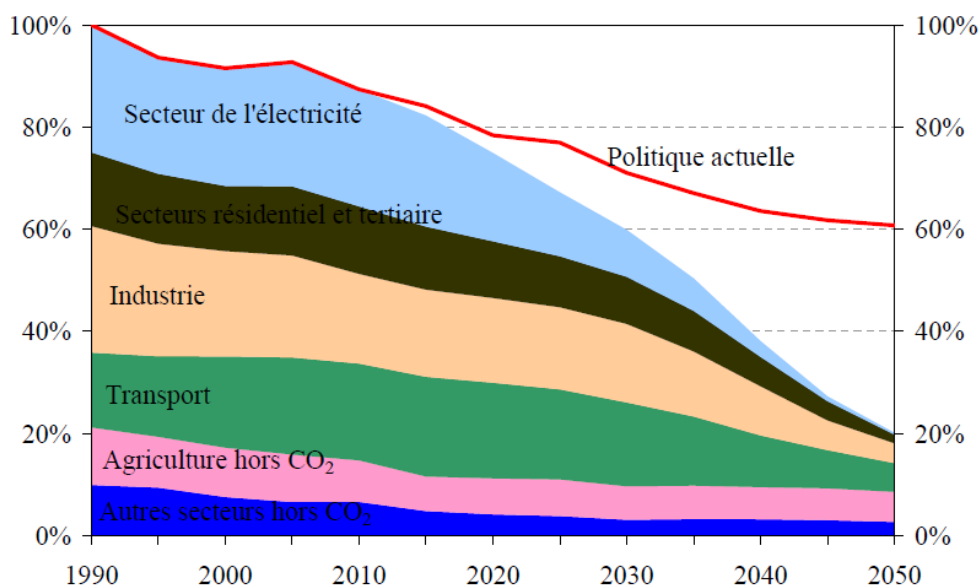
La transition énergétique européenne se structure autour de trois enjeux majeurs (EC, 2011) :

- La durabilité
- La compétitivité
- La sécurité d'approvisionnement

L'UE a fixé un objectif à l'horizon 2050 de réduction des émissions de GES de 80% par rapport au niveau de 1990 pour contribuer à limiter le réchauffement climatique à 2°C. Des trajectoires possibles pour atteindre cet objectif et répondre aux enjeux cités précédemment sont données dans les feuilles de route⁴³ (EC, 2011) produite par la Commission Européenne. La Figure 22 montre la trajectoire de réduction des émissions par secteur proposée par la « feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050 » (EC, 2011). Nous pouvons observer que tous les secteurs (hors secteur agricole) sont mis à contribution. L'objectif de réduire d'ici 2050 les émissions de 80% par rapport à 1990 (100% représente les émissions de GES en 1990), est bien en deçà de la tendance actuelle.

⁴³ Energy roadmaps et [Roadmap for moving to a competitive low-carbon economy in 2050](#), EC, 2011.

Figure 22 Émissions de GES dans l'UE –Vers une réduction des émissions internes. Source: EC, 2011



Toutefois, la politique européenne de l'énergie et du climat a été principalement mise en place avec le Paquet Energie-Climat adopté en 2008 par le Parlement Européen. Il s'agit d'un paquet législatif qui se structure autour de trois objectifs phares à atteindre d'ici 2020 :

- émissions de GES : réduire de 20% les émissions de gaz à effet de serre par rapport à leurs niveaux de 1990 ;
- énergies renouvelables (ENR) : porter la part des énergies renouvelables à 20% de la consommation d'énergie finale ;
- efficacité énergétique (EE) : réaliser 20% d'économies d'énergie.

Pour atteindre ces objectifs (communément appelé 3x20), une série de directives a été adoptée en matière d'énergie et du climat. A titre d'exemple, la Directive 2009/28/CE votée par le Parlement en 2009 vise à mettre en place un cadre commun relatif à la production et à la promotion d'énergie à partir de sources renouvelables. Elle fixe notamment les objectifs nationaux en matière d'énergies renouvelables (dans le secteur électrique, la production de chaleur et les transports).

Par ailleurs, la politique européenne en matière de climat repose également sur un instrument introduit en 2003 suite au Protocole de Kyoto (1997) : l'*Emission Trading Scheme* (ETS) qui permet de donner un prix au CO₂⁴⁴. Le système est dit « cap-and-trade ». « Cap » car il a pour objectif de fixer un niveau d'émissions limite (« cap ») pour les secteurs fortement émetteurs⁴⁵, qui est lui-même revu à la baisse chaque année. « Trade » car des crédits d'émissions sont alloués aux entreprises cibles qui peuvent en acheter et vendre sur le marché européen (« trade ») pour atteindre leurs objectifs de réduction fixés au travers du « cap ».

La structure de la politique européenne énergétique et climatique reposant sur ces trois objectifs détient l'avantage d'activer des leviers d'actions différents (énergies renouvelables, efficacité

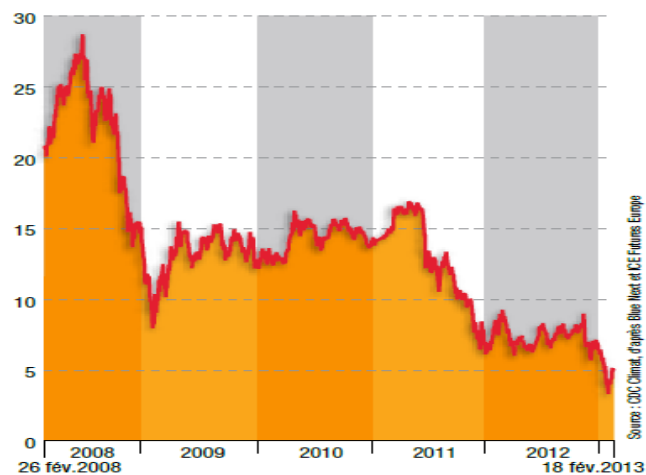
⁴⁴ Ce qui en outre permet d'internaliser les externalités liées aux émissions de GES qui contribuent au réchauffement climatique.

⁴⁵ Centrales de production d'électricité, industries intensives en énergie et aviation civile.

énergétique etc.) pour engager la transition énergétique européenne. Mais cette structure est parfois critiquée notamment parce qu'elle favorise les interactions entre les instruments au risque de les rendre moins efficaces. Aussi deux grandes tendances se dessinent dans la discussion européenne :

- Les partisans d'un unique objectif de réduction des émissions de GES accompagné d'un signal-prix du carbone fort, dont les critiques sont principalement portées sur le recouvrement des politiques qui peut altérer l'efficacité de certains instruments. L'exemple le plus parlant est celui du prix du carbone qui a complètement chuté depuis l'ouverture du marché, avoisinant aujourd'hui les 4€/tCO₂.

Figure 23 Evolution du prix au comptant des crédits carbone, en euros/tonnes de CO₂. Source : CDC Climat



Le prix du carbone a souffert d'une part de la crise économique actuelle qui a causé une baisse de l'activité économique dans l'UE depuis 2008. Les entreprises et industries dont l'activité a été réduite ont émis moins de CO₂ que ce qui avait été fixé par le « cap ». Ainsi plus de quotas étaient disponibles pour les échanges (« trade »). La loi offre-demande explique le signal-prix du carbone plus faible que celui qui avait été envisagé (initialement prévu aux environs de 25€/tCO₂). Un signal prix trop faible ne permet pas de stimuler les investissements dans des technologies bas carbone. D'autre part, cet instrument a été impacté par les interactions avec les autres politiques européennes visant à favoriser l'introduction des énergies renouvelables dans les mix-énergétiques et à améliorer l'efficacité énergétique (Hafner & Glachant, 2011).

- Les partisans d'objectifs multiples, quant à eux, considèrent qu'un seul objectif de réduction des émissions associé à un prix du carbone ne peut pas donner un signal suffisant pour catalyser le changement. Ils estiment que des mesures supplémentaires sont nécessaires pour pallier aux défaillances de marché. A titre d'exemple, l'inefficacité de l'instrument de marché ETS peut être attribuée en partie au manque de rareté citée précédemment.

Un débat a donc lieu pour savoir s'il est opportun de reprendre le format actuel du paquet énergie climat pour celui qui devra couvrir la période 2020-2030. Mais la problématique du prochain paquet énergie climat peut être abordée en d'autres termes. En effet, les politiques européennes énergétiques et climatiques interagissent avec des niveaux de gouvernance différents : international, européen, mais aussi national (celui des États Membres), voire régional et même local. L'interaction avec des niveaux de gouvernance de petite échelle pose la question de la valeur ajoutée d'une

politique européenne et du niveau de gouvernance approprié pour intervenir (Rüdinger & Spencer, 2012). Ces politiques européennes peuvent permettre par exemple de donner une vision commune de la transition énergétique, comme le font par exemple les feuilles de route et les objectifs communs du « 3x20 ». Elles peuvent aussi donner un cadrage aux décisions prises par les États Membres, améliorer la coordination et l'harmonisation des politiques nationales, permettre le partage d'informations ou encore assister les États Membres dans la conduite de leurs politiques.

En mars 2014, la Commission Européenne présentera son projet de paquet énergie-climat pour la décennie 2020-2030. Or comme il a été montré dans la partie précédente, certains États Membres ont déjà amorcé leur transition énergétique. Les directions prises par ces pays sont différentes, parfois décidées, parfois incertaines. C'est pourquoi la question du rôle de la politique européenne pour supporter les transitions nationales doit être posée en amont des négociations. Des éléments de réponse à cette question peuvent être apportés en introduisant la notion de valeur ajoutée. En effet la politique européenne peut bénéficier à la transition de certains pays mais une même politique peut aussi entraver certains changements.

Pour évaluer la valeur ajoutée d'une politique européenne pour les transitions nationales, il est essentiel dans un premier temps d'identifier les stratégies nationales, leurs zones d'incertitudes et les enjeux autour desquels se structure cette stratégie. L'analyse des scénarios nationaux qui fait l'objet de cette étude nous fournit des éléments de réponse sur la manière dont les pays perçoivent les enjeux et incertitudes de leurs transitions nationales. A partir de ces éléments, nous pouvons mener une réflexion sur les enjeux qu'ils représentent en matière de politique européenne. Dans les sous-sections suivantes, nous présenterons deux secteurs clés pour la transition et pour lesquels la politique européenne peut avoir une valeur ajoutée :

- **Le secteur des transports :**

Les émissions du secteur des transports représentent effectivement près d'un quart des émissions de l'UE et continuent d'augmenter depuis 1990⁴⁶ contrairement aux autres secteurs (voir la feuille de route : Figure 22). D'autre part, il s'agit d'un secteur encore peu concerné par les politiques énergétiques et climatiques européennes. La proposition de la Commission Européenne (COM/2012/393), qui suggère un standard d'émissions pour les véhicules particuliers (95gCO₂/km), et la directive 2009/28/CE sur les énergies renouvelables qui fixe la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique du secteur à 10%, sont les principales mesures qui contribuent à limiter les émissions. Enfin, ce secteur transfrontalier est essentiel pour les échanges entre pays européens. Ces caractéristiques en font un secteur au cœur des questions de coordination européenne.

- **Le secteur électrique :**

Le secteur électrique est la principale cible du système ETS. Il doit atteindre un objectif de quasi neutralité en carbone d'ici 2050 (voir la feuille de route : Figure 22). De plus, il est au centre du débat sur le choix des options technologiques de décarbonisation du secteur qui oppose le modèle fondé sur un développement massif des énergies renouvelables et celui plus traditionnel du nucléaire. Nous reviendrons sur cette dichotomie dans la sous-section 3.3. Enfin, une discussion a été lancée sur la

⁴⁶ En 2007, elles avaient augmenté de 36% par rapport à 1990 alors que les émissions des autres secteurs avaient diminué de 15%.

nécessité de réformer le marché électrique pour permettre aux technologies sobres en carbone, qui ont un coût du capital financier élevé, de se développer et d'être concurrentielles face aux énergies conventionnelles.

3.2. Le secteur des transports

Le secteur des transports est un enjeu qui est bien identifié dans les scénarios. Il est toutefois sujet à de nombreuses incertitudes qui se concentrent principalement sur les innovations technologiques.

Les scénarios ont principalement activé quatre leviers :

- Electrification du secteur
- Pénétration du vecteur gaz
- Utilisation des biocarburants
- Evolution de la mobilité

Nous ne traiterons dans cette partie que les deux premiers leviers qui sont la pénétration des vecteurs électricité et gaz dans le secteur des transports.

3.2.1. Electrification des transports

Ce levier d'action représente un potentiel conséquent en matière d'efficacité énergétique⁴⁷ d'une part et en matière de substitution des énergies fossiles d'autre part (en considérant que l'électricité est produite à partir de sources sobres en carbone). Ces deux raisons expliquent entre autres que la majorité des scénarios activent ce levier.

⁴⁷ Dans la partie 2 est évoqué le gain d'efficacité énergétique permis par l'utilisation de moteur électrique dont le rendement est bien supérieur à celui des moteurs thermiques.

Figure 24 Comparaison des scénarios⁴⁸ dans le secteur des transports pour le levier électrification (I=importance, P=précision, V=variabilité)

Secteur des transports	France				Royaume Uni				Allemagne			
		I	P	V		I	P	V		I	P	V
Électrification des transports	DEC	xxx	xxx	xx	RES	xxx	xxx	xx	A	xx	xxx	xx
	DIV	xx	xxx		CCS	xx			B	xx		
	EFF	xxx	xxx		Nuclear	xx			C	xxx		
	SOB	xx	xxx									
	L'activation de ce levier est variable selon les trajectoires. Le taux d'électrification des transports varie entre 10% (DIV) et 30% (EFF)				Selon les scénarios, les véhicules sont majoritairement hybrides (CCS et nucléaire) ou tout électriques (RES) et le vecteur électricité à une place importante dans le secteur des transports				Forte utilisation des véhicules électriques, avec un taux d'électrification du secteur compris entre 14 et 25%. Un développement assez conséquent des véhicules électriques est présent dans ces trois variantes.			

Ce tableau nous montre que tous les scénarios activent ce levier. En effet dans les scénarios ce levier joue un rôle important dans la décarbonisation du secteur et est bien renseigné. De plus, la dimension « variabilité » entre les scénarios d'un même pays est relativement faible.

Ce levier s'articule autour du développement des véhicules électriques et des voies ferroviaires (pour le fret et le transport de personnes). Selon les scénarios plus ou moins ambitieux, les technologies utilisées sont des véhicules électriques ou hybrides rechargeables. Cette convergence vers l'électrification des véhicules semble être un défi majeur pour l'Europe car il soulève le problème des **infrastructures**. En effet, développer les véhicules électriques (hors ferroviaire) implique la mise en place d'un réseau de points de charge (ou d'échange de batterie) au même titre que les stations-services existantes. Cela pose de nombreux défis pour l'Europe :

Amorcer le changement : Voyager en véhicules tout électrique à l'horizon 2030 signifie qu'il faudrait commencer dans la décennie à venir à développer un réseau de bornes d'alimentation électrique (à titre indicatif, l'UE compte environ 110 000 stations-services). Or, dans un contexte où le pétrole est encore très compétitif, susciter des investissements dans ce type d'infrastructures semble complexe et nécessite une forte volonté communautaire.

Développer les véhicules électriques et les infrastructures à travers toute l'Europe : Il est nécessaire de limiter les disparités au niveau européen afin d'éviter d'avoir des régions trop en avance sur

⁴⁸ Rappel de la dénomination des scénarios :

France : **DEC** : Demande moyenne et diversification (inspiré de Négatep); **DIV** : Demande moyenne et diversification (inspiré de ANCRE DIV) ; **EFF** : Efficacité énergétique et diversification (inspiré du scénario ADEME); **SOB** : Sobriété énergétique et sortie du nucléaire (inspiré de Négawatt)

Royaume Uni : **RES** : orienté vers les énergies renouvelables; **CCS**: orienté vers le stockage géologique du carbone ; **Nuclear** : orienté vers l'énergie nucléaire

Allemagne : variantes sur les transports : **A** : véhicules électriques + véhicules à hydrogène ; **B** : véhicules électriques + véhicules fonctionnant à partir de gaz synthétique issu du processus de méthanation ; **C** : véhicules électriques

d'autres régions. Pour cela le développement des véhicules électriques et des infrastructures (d'alimentation des véhicules électriques et ferroviaire) doit être assuré sur tout le territoire européen. Dans le cas contraire, le système de transport risquerait d'être discontinu et incohérent (par exemple, un véhicule électrique ne pourrait être utilisé dans certains pays). Ce point est essentiel car l'UE repose sur un principe fondamental de libre-échange des biens et des personnes entre ses États Membres.

Standardiser l'alimentation (voltage, prises électriques, etc.) : Il paraît également important d'assurer la cohérence entre les points d'alimentation et les batteries des véhicules électriques dans tous les États Membres.

Ces points ne sont pas exhaustifs. D'autres éléments comme les enjeux liés à la transformation de l'industrie automobile et le rôle que pourrait jouer l'Europe pour donner une direction commune à l'industrie automobile mériteraient d'être également étudiés. Toutefois, nous pouvons déjà dire que si les pays de l'UE souhaitent s'engager dans la voie des véhicules électriques, ils auront à faire face aux défis d'infrastructures cités précédemment. Dans ce domaine, il semble que la politique européenne pourrait avoir une valeur ajoutée en matière d'harmonisation et de coordination, et pour rassembler et assurer la cohésion de tous ses États Membres.

3.2.2. Pénétration du vecteur gaz

Le gaz est également un levier d'action pour la décarbonisation. Selon les scénarios, il provient de différentes sources:

- Gaz naturel
- Biogaz (processus de méthanisation de la biomasse et des déchets)
- Méthanation/Hydrogène (processus de synthèse du méthane)

Le gaz présente l'avantage de pouvoir réaliser la transition de manière progressive allant du gaz naturel au gaz de synthèse et/ou hydrogène. C'est un vecteur qui a un potentiel d'hybridation avec les énergies renouvelables intermittentes (l'hydrogène et la méthanation sont des produits à partir d'électricité), en d'autres termes il peut être une forme de stockage et de transformation de l'électricité lorsque la production dépasse la demande.

Secteur des transports	France				Royaume Uni				Allemagne			
		I	P	V		I	P	V		I	P	V
Vecteur gaz	DEC	x	xx	xx	RES	xxx	xxx	xxx	A	xx	xxx	xxx
	DIV	xxx	xxx		CCS	xx			B	xx		
	EFF	Xxx	xxx		Nuclear	xx			C	0		
	SOB	xxx	xxx									
	DIV, EFF et SOB utilisent ce levier d'action. Les véhicules sont d'abord au gaz naturel qui est progressivement remplacé par du biogaz . SOB envisage également de le remplacer par du gaz de synthèse .				Le gaz n'est présent dans les scénarios que sur les dernières décennies de la transition. Il s'agit uniquement d' hydrogène . Les véhicules sont alors équipés de pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène. Les niveaux de pénétration des véhicules à hydrogène sont très variables entre les scénarios, ce qui révèle des incertitudes sur cette technologie.				Deux des trois variantes mobilisent le gaz de synthèse (hydrogène et méthane de synthèse) . Il s'agit du principal thème de variation entre les variantes du scénario allemand, ce qui montre une certaine incertitude quant aux possibilités d'innovations technologiques pour les véhicules fonctionnant au gaz de synthèse.			

Les scénarios montrent une certaine convergence vers ce vecteur énergie. Toutefois, ils présentent également de nombreuses incertitudes quant à la production de gaz de synthèse et aux technologies de véhicules qui les utiliseront comme carburant.

Au même titre que la rubrique précédente, mais dans une moindre mesure, ce levier d'action présente un enjeu majeur sur les bornes d'alimentation. En effet, contrairement aux bornes électriques, les stations-services existantes peuvent être utilisées comme point d'alimentation pour le gaz également (ce principe existe déjà pour le GPL). Un point supplémentaire concernant les infrastructures de transport et de distribution du gaz peut être soulevé. Contrairement à l'électricité ce dernier est plus difficilement transportable. Les infrastructures actuelles de gaz alimentent principalement le résidentiel tertiaire et l'industrie. Seul le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) ou le Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) sont actuellement utilisés pour les transports mais dans une faible mesure. Toutefois, ces gaz ne représentent pas une solution durable pour les transports car les coûts de transformation sont très élevés. D'autre part, des incertitudes persistent sur le développement des technologies dans ce secteur. Il semble qu'une politique européenne de partage des connaissances et de financement de la recherche peut avoir à ce stade une véritable valeur ajoutée.

Les deux leviers d'action présentés précédemment sont les principaux leviers d'ordre technico-économique mobilisés dans les scénarios. Nous aurions également pu nous intéresser aux biocarburants qui peuvent représenter dans certains scénarios 20 à 30% de la consommation énergétique du secteur. Les biocarburants sont néanmoins sujets à de nombreuses controverses pour plusieurs raisons : d'une part, ils ne permettent pas de réduire significativement les émissions de GES (les ACV montrent que les émissions d'un litre d'éthanol depuis sa production jusqu'à sa

consommation sont proches de celles de l'essence) et d'autre part l'impact environnemental du processus de production n'est pas neutre, notamment parce que la production de biocarburants se fait à partir de monocultures⁴⁹ s'étendant sur des surfaces considérables. L'Europe aurait donc un rôle à jouer sur l'harmonisation des réglementations environnementales de ses États Membres.

Par ailleurs, nous n'avons pas évoqué dans cette sous-section l'évolution de la mobilité des personnes et des marchandises qui représente également un véritable potentiel d'action pour réduire la demande énergétique du secteur. L'évolution de la mobilité relève de choix de société. A titre d'exemple, pour réduire la mobilité des personnes en milieu urbain, il conviendrait de prendre des mesures pour freiner l'étalement urbain, ce qui revient à changer de modèle de société. L'Europe a-t-elle un rôle à jouer pour soutenir les pays dans leurs choix ou orienter ceux qui n'en ont pas fait? Est-elle légitime à intervenir sur ces choix de société? Autant d'interrogations qui mériteraient d'être approfondies dans une prochaine phase de ce travail.

3.3. Le secteur électrique

Le secteur électrique représente plus d'un quart des émissions européennes de GES. L'UE y voit un potentiel de réduction des émissions important (la feuille de route 2050 prévoit une décarbonisation quasi intégrale du secteur d'ici 2050). Il est donc la cible de nombreux instruments de politiques européennes (ETS⁵⁰, objectif énergie renouvelable, marché de l'électricité communautaire, etc.). Toutefois le choix du mix électrique relève de la souveraineté nationale, un principe qui a été réaffirmé par le Traité de Lisbonne (2007) et qui entretient l'ambiguïté en écrivant que les pays maintiennent leur souveraineté mais restent soumis aux politiques communautaires.

De la comparaison des scénarios, deux éléments émergent de l'analyse du secteur électrique. Ils sont :

- Les choix de technologies de décarbonisation
- L'évolution de la demande en électricité

Les deux grandes options technologiques de décarbonisation envisagées dans les scénarios sont les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. Les tableaux suivants proposent une analyse comparative des technologies de décarbonisation (énergies renouvelables et nucléaire) mobilisées dans les scénarios.

⁴⁹ Cultures de tournesol, colza ou betteraves.

⁵⁰ Emission Trading System, voir section 0.

Secteur électrique	France				Royaume Uni				Allemagne			
		I	P	V		I	P	V		I	P	V
Energies renouvelables⁵¹ (intermittentes)	DEC	x	x	xxx	RES	xxx	xxx	xxx	A	xxx	xxx	0
	DIV	xx	xx		CCS	xx			B	xxx		
	EFF	xxx	xxx		Nuclear	xx			C	xxx		
	SOB	xxx	xxx									
	Grande variabilité : la diversification du mix électrique étant un critère de distinction entre les trajectoires En 2050, la part des énergies intermittentes dans le mix électrique varie de 10% à 70% selon les scénarios.				Grande variabilité : les énergies renouvelables sont un critère de distinction entre les trajectoires En 2050, la part des énergies intermittentes dans le mix électrique varie de 10% à 60%.				Les énergies renouvelables intermittentes (éolien on- et offshore, solaire) sont un levier qui joue un rôle prépondérant dans le scénario allemand. Le changement se structure autour d'un développement massif des ENR afin de remplir les objectifs de sortie du nucléaire et du charbon. En 2050 la part des énergies intermittentes dans le mix électrique est de 85%.			

Secteur électrique	France				Royaume Uni				Allemagne			
		I	P	V		I	P	V		I	P	V
Nucléaire	DEC	xxx	xxx	xxx	RES	x	xxx	xxx	A	0	xxx	0
	DIV	xx	xxx		CCS	xx			B	0		
	EFF	x	xxx		Nuclear	xxx			C	0		
	SOB	0	xxx									
	Le nucléaire en France est un sujet central dans le débat de la transition énergétique car il représente 75% de la production d'électricité aujourd'hui. La France comme d'autres pays d'ailleurs, a un choix complexe à faire vis-à-vis du nucléaire puisque de nombreuses centrales nucléaires françaises arriveront en fin de vie au cours de cette décennie.				Les problématiques d'acceptabilité de cette technologie ont été prises en compte dans la construction des scénarios. Un des scénarios prévoit néanmoins que 86% de la production d'électricité soit d'origine nucléaire. Les autres scénarios réservent une part moindre au nucléaire (20 et 24%) mais on peut toutefois remarquer que tous les scénarios utilisent le nucléaire dans le mix énergétique.				L'Allemagne prévoit la sortie du nucléaire en 2022 et cet objectif est inscrit dans la loi. La sortie du nucléaire est un véritable catalyseur du changement			

Ces deux tableaux mettent en exergue les différences de positionnements des pays pour leur mix électrique en fonction des scénarios. Ils montrent une diversité de composition du mix. L'Allemagne a fait un choix clair de sortie du nucléaire et du développement massif des énergies renouvelables. Au Royaume Uni, des incertitudes persistent sur le choix des options technologiques, le nucléaire comme les énergies renouvelables sont des options potentielles. La France, quant à elle, a des

⁵¹ Les énergies renouvelables qui sont développées dans le secteur électrique sont majoritairement de l'énergie éolienne (on et off-shore) et photovoltaïque. D'autres énergies telles que les énergies marines (marée, courants marins, hydroliennes) sont également présentes dans les scénarios mais dans une moindre mesure.

trajectoires très contrastées pour la décarbonisation de son mix électrique. La trajectoire DEC s'oriente complètement dans le nucléaire, la trajectoire SOB dans les énergies renouvelables tandis que les deux autres trajectoires prévoient des mix plus diversifiés. L'objectif du Président de la République française, François Hollande, d'abaisser la part du nucléaire montre néanmoins une volonté politique de diversifier le mix.

A ce stade nous pouvons remarquer que les pays ont pris des orientations de décarbonisation différentes. Cela pose des questions sur le contenu et la forme des politiques européennes futures en particulier:

- L'UE peut-elle imposer un choix de technologies sobres en carbone dans le cadre d'objectifs communautaires?
- Quelles sont les réformes du marché de l'électricité que l'UE pourrait mettre en place pour favoriser les énergies décarbonées ?

Par ailleurs, quelles que soient les options technologiques de décarbonisation choisies, l'évolution de la consommation d'électricité pose un défi majeur. En effet, c'est le niveau de demande qui dimensionne la quantité d'unités de production à installer. Plus la demande croît, plus le défi en matière d'infrastructures devient important. Le tableau suivant représente de manière quantitative les niveaux de consommation d'électricité envisagés par les scénarios en donnant le pourcentage de réduction prévu en 2050 par rapport au niveau de 2010.

Consommation en 2050 par rapport à 2010	Forte réduction <-25%	Faible réduction -15%<...<0	Faible augmentation 0<...<15%	Forte augmentation >35%
France				
DEC				
DIV				
EFF				
SOB				
Royaume Uni				
RES				
CCS				
Nuclear				
Allemagne				
A				
B				
C				

En France, les trajectoires ne prévoient pas les mêmes niveaux de consommation. Les trajectoires DEC et DIV envisagent une augmentation de la consommation due à l'électrification massive des besoins énergétiques (dans le secteur des transports et du bâtiment en particulier). A l'inverse, les trajectoires EFF et SOB prévoient une réduction de la demande due à la diversification des vecteurs-énergie utilisés. En effet, dans ces trajectoires la production d'énergie tend à se rapprocher du besoin, ce qui signifie par exemple que, pour les besoins de chauffage dans les bâtiments, ces trajectoires utiliseront des sources de chaleur de proximité (solaire thermique, géothermie par

exemple) ou des réseaux de chaleur (récupération de chaleur ou cogénération par exemple) plutôt que de l'électricité (chauffage par effet Joule). Les scénarios britanniques envisagent des niveaux de consommation électrique semblables aux niveaux de la trajectoire DEC. Le scénario RES prévoit néanmoins une consommation moins élevée que les deux autres. Ces consommations peuvent être affectées principalement à l'électrification du secteur des transports, et à l'utilisation massive des pompes à chaleur (PAC) pour les besoins de chauffage dans le secteur du bâtiment. Enfin, le scénario allemand prévoit une réduction importante de la consommation électrique privilégiant comme SOB et EFF une production d'énergie adaptée aux besoins.

Nous pouvons remarquer que les scénarios s'appuyant sur un développement important des énergies renouvelables prévoient des niveaux de consommation plus faibles que les scénarios orientés vers le nucléaire. En effet, les scénarios orientés vers l'énergie nucléaire considèrent que cette énergie aura la capacité de répondre à une demande croissante tandis que les scénarios orientés vers les énergies renouvelables soutiennent un modèle de société plus sobre.

Cependant quelle que soit la trajectoire choisie en termes de technologies de décarbonisation et de niveau de la demande en électricité, une problématique identique se dessine pour tous les scénarios : le besoin de **flexibilité** dans la demande et dans la production. En effet :

1. L'électrification tend à augmenter les variations de consommation (par exemple, les véhicules électriques particuliers auront tendance à être rechargés au même moment).
2. Les énergies renouvelables sont intermittentes. Ainsi, pour répondre au manque ou au surplus de production de ces énergies, elles imposent un besoin de flexibilité tant dans la demande que dans le reste de la production.
3. L'énergie nucléaire est une énergie fonctionnant en régime constant⁵², c'est-à-dire dont la production est relativement lisse et peu flexible. L'électricité nucléaire ne suffit donc pas pour répondre aux pointes de consommation journalières.

Pour répondre à ces besoins de flexibilité, il est nécessaire d'avoir des **réseaux interconnectés** afin de faciliter les échanges transfrontaliers. Il y a un intérêt à avoir un grand nombre d'interconnexions pour répondre à la diversité des besoins que ce soit en termes de volume ou de période. L'UE aurait donc un rôle à jouer pour favoriser le déploiement des interconnexions entre les pays.

Il ressort de cette troisième partie que l'analyse comparative des scénarios dans le secteur des transports et le secteur électrique a permis de mettre en avant certains défis dont l'Europe pourrait s'emparer, tels que les interconnexions des réseaux électriques ou les infrastructures de distribution dans le secteur des transports.

⁵² La production d'électricité d'origine nucléaire est très peu modulable. En effet, contrairement aux centrales à gaz, fioul ou charbon, les centrales nucléaires ne supportent pas des variations brusques de régimes.

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif d'alimenter une réflexion sur l'élaboration des politiques européennes de l'énergie et du climat à partir de l'étude des scénarios nationaux. Nous nous sommes intéressés à trois pays leaders en Europe : la France, l'Allemagne et le Royaume Uni.

La première étape de ce travail nous a permis de répondre au principal enjeu de cette étude qui était de construire la réflexion sur la politique européenne à partir de scénarios de transition énergétique. En effet, les scénarios choisis par les pays sont de nature très différente. Tout d'abord, les hypothèses structurantes diffèrent d'un pays à l'autre, voire d'un scénario à l'autre. Par ailleurs, les approches de modélisation utilisées sont très différentes notamment car les modèles se multiplient d'année en année dans le domaine de l'énergie et du climat. En outre, plusieurs méthodes de construction des scénarios existent. Enfin, la nature du processus politique et les interactions avec les scénarios sont propres à chaque pays. Pour répondre à cet enjeu, nous avons élaboré un cadre d'analyse qualitatif qui permet de comparer la nature et le rôle donnés aux leviers d'action dans les scénarios. Pour qualifier ces leviers, nous avons choisi trois critères :

- l'importance du levier d'action dans la structuration du changement,
- le degré de précision avec lequel le levier est renseigné,
- la variabilité entre les scénarios d'un même pays.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé un aperçu de l'état et de la nature des processus politiques dans les trois pays étudiés, ainsi que les méthodes de prospective utilisées par ces pays. L'Allemagne a déjà largement engagé sa transition énergétique, qu'elle nomme Energiewende, et qui se structure autour d'un développement massif des énergies renouvelables comme l'illustre son scénario phare (Leitstudie 2011). La transition énergétique du Royaume Uni s'articule autour de budgets carbone et adopte une approche plus libérale. Le Royaume Uni défend le concept de « neutralité technologique », c'est-à-dire qu'aucune technologie n'est privilégiée. Ce concept se retrouve dans les scénarios utilisés dans son plan climat (Carbon Plan). Enfin, la France a mené un Débat National sur la Transition Énergétique et construit par celui-ci de manière innovante quatre trajectoires de transition contrastées (DEC, DIV, EFF et SOB)⁵³.

Dans la troisième partie, nous avons pu tester le cadre d'analyse sur deux leviers d'action du secteur des transports et du secteur électrique. Cela nous a permis d'identifier certains enjeux et défis pour l'élaboration des politiques européennes futures dans ces deux secteurs. Dans le secteur des transports, nous avons pu identifier plusieurs défis majeurs concernant les infrastructures pour lesquels l'Europe aurait un rôle à jouer en termes d'incitation, de coordination et d'harmonisation. Le secteur électrique est un secteur complexe car des nombreux mécanismes européens interagissent avec ce secteur. L'analyse comparative aura permis d'une part de montrer que les choix d'options technologiques de décarbonisation sont très différentes selon les pays, et d'autre part de réorienter le débat sur une question fondamentale qui permet de mieux évaluer le défi que représente la décarbonisation du système électrique pour les pays : la demande en électricité. En conclusion,

⁵³ DEC=décarbonisation par l'électricité, DIV=demande moyenne et diversification, EFF=efficacité énergétique et diversification, SOB=sobriété énergétique et sortie du nucléaire.

l'Europe aura probablement un rôle à jouer en matière d'infrastructures réseau et pour promouvoir les technologies décarbonées.

Ces trois étapes ont donc permis de répondre à la problématique en se focalisant sur deux secteurs en particulier. Cette étude sur les scénarios propose ainsi un cadrage nouveau des problématiques européennes.

Toutefois, elle peut être améliorée sur plusieurs points (non exhaustifs) :

- Premièrement, le cadre d'analyse qui a été construit est qualitatif. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse en utilisant des critères plus quantitatifs qui permettraient d'avoir une classification plus robuste.
- Deuxièmement, nous ne nous sommes intéressés qu'à trois pays européens faisant partie des plus avancés de l'UE en matière de transition énergétique. Il est essentiel d'élargir l'analyse à d'autres pays européens, comme les pays de l'Europe de l'Est, dont les problématiques sont très différentes des trois pays étudiés ici.
- Troisièmement, les scénarios ne remplacent pas les décisions politiques. Ce travail s'est concentré sur l'analyse de scénarios et ne s'est pas focalisé sur les aspects de mise en œuvre de ces transitions. La troisième partie sur la politique européenne avait pour objectif d'identifier les enjeux pour la politique européenne future. Dans la prochaine étape de ce travail, la question de la valeur ajoutée d'une politique européenne pour la mise en œuvre des transitions nationales pourrait être approfondie. Pour cela, il faudrait notamment mener une étude sur les enjeux de mise en œuvre de ces transitions à l'échelle nationale, en d'autres termes il s'agirait d'analyser les mesures qui sont mises en place par les États Membres et qui seraient nécessaires pour rendre possible ces transitions. Il s'agirait d'un cadrage complémentaire pour alimenter la réflexion sur l'élaboration des politiques européennes futures.

Pour conclure, le défi est grand pour les instances européennes. La devise de l'Europe : « *Être unie dans la diversité* » prend tout son sens quand il s'agit de traiter des problématiques énergétiques. En effet, le secteur de l'énergie s'est toujours trouvé à l'interface entre souveraineté nationale et politiques communautaires. Malgré les différentes transitions énergétiques engagées dans certains pays de l'UE, il serait intéressant de fonder une véritable Communauté européenne de l'énergie qui permettrait de mieux soutenir ces transitions.

Références

- Bellevrat, E., Rüdinger, A., Colombier, M., & Guérin, E. (2013). Scénarios de transition énergétique pour la France : définir un espace de discussion pour le débat.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739. doi:10.1016/j.futures.2005.12.002
- Climate Change Committee. (2010). *The Fourth Carbon Budget*.
- Crassous, R. (2008). MODELISER LE LONG TERME DANS UN MONDE DE SECOND RANG : APPLICATION AUX POLITIQUES CLIMATIQUES.
- Criqui, P., & Masset, P. (2013). *Rapport GT2 Quelle trajectoire pour atteindre le mix énergétique en 2025 ? Quels types de scénarios possibles à horizons 2030 et 2050, dans le respect des engagements climatiques de la France ?*
- Federal Ministry for the Environment Nature conservation and nuclear safety. (2011). The Federal Government's energy concept of 2010 and the transformation of the energy system of 2011, 2010(September 2010).
- Fernandez, S., Bouleau, G., & Treyer, S. (2011). Reconsidérer la prospective de l'eau en Europe dans ses dimensions politiques. *Développement durable et territoires*, 2(Décembre).
- Fraunhofer institute. (2012). Leitstudie 2011-2012.
- Garb, Y., Pulver, S., & VanDeveer, S. D. (2008). Scenarios in society, society in scenarios: toward a social scientific analysis of storyline-driven environmental modeling. *Environmental Research Letters*, 3(4), 045015. doi:10.1088/1748-9326/3/4/045015
- Hafner, M., & Glachant, J. (2011). *THINK: Transition Towards a Low Carbon Energy System by 2050 : What Role for the EU ?* doi:10.2870/35290
- HM government. (2011). The Carbon Plan: Delivering our low carbon future, (December).
- Mermet *et al.* (2003). Perspectives pour l'environnement, quelles recherches ? quelles ressources ? quelles méthodes ? *La Documentation Française*.
- O'Neill, B., Pulver, S., VanDeveer, S., & Garb, Y. (2008). Where next with global environmental scenarios? *Environmental Research Letters*, 3(4), 045012. doi:10.1088/1748-9326/3/4/045012
- Pintér, L. (2002). *Making Global Integrated Environmental Assessment And Reporting Matter*.
- Raskin, P., Monks, F., Ribeiro, T., Vuuren, D. Van, Zurek, M., Editors, R., ... Field, C. (1995). Chapter 2: Global Scenarios in Historical Perspective. In *Ecosystems and HumanWell-being: Scenarios*.
- Rüdinger, A., & Spencer, T. (2012). Information Note: Elements of an Analytical Framework for European Climate and Energy Policies, (September), 2011–2013.
- Van der Steen, M., & van Twist, M. (2012). Beyond use: Evaluating foresight that fits. *Futures*, 44(5), 475–486. doi:10.1016/j.futures.2012.03.009
- Van Vuuren, D. P., Kok, M. T. J., Girod, B., Lucas, P. L., & de Vries, B. (2012). Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change*, 22(4), 884–895. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001

Glossaire des énergies

Sources :

<http://www.vie-publique.fr/politiques-publiques/politique-energie/glossaire/#e>

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/glossaire#e>

Biocarburant : Carburant obtenu par la transformation de produits d'origine végétale ou animale (alcools, éthers, esters et huiles) - on parle ainsi de biodiesel ou biogazole, de biokérozène.

Biomasse : Regroupe l'ensemble de la matière végétale susceptible d'être collectée à des fins de valorisation énergétique, notamment le bois, le biogaz, la paille.

CO2 : Dioxyde de carbone ou gaz carbonique. Il est l'un des gaz à effet de serre produit notamment par la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel).

Cogénération : Technique de production combinée d'électricité et de chaleur. L'avantage de la cogénération est de récupérer la chaleur dégagée par la combustion alors que dans le cas de la production électrique classique, cette chaleur est perdue.

Consommation finale : Quantité d'énergie disponible pour l'utilisateur final. Elle exclut les pertes de distribution et les énergies consommées comme matière première.

Consommation primaire : Comprend la consommation d'énergie finale, la consommation de la branche énergie et l'énergie consommée comme matière première.

Efficacité énergétique : Stratégie qui réduit les consommations d'énergie à service rendu égal. Elle entraîne la diminution des coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie, tout en permettant d'augmenter la qualité de vie des usagers présents et futurs.

Énergie fossile : Énergie produite à partir de combustibles fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel. Ces combustibles, dont les ressources sont limitées, sont composés essentiellement de carbone (et d'hydrogène pour le gaz et le pétrole). Leur combustion permet de produire de l'électricité et de la chaleur. Leur combustion émet des polluants, dont le dioxyde de carbone (CO₂) gaz le plus incriminé dans le réchauffement climatique.

Énergie fissile : Qualifie l'énergie de fission produite dans les réacteurs nucléaires par la rupture des noyaux atomiques de combustibles à base d'uranium.

Énergie nucléaire : Type d'énergie thermique qui permet de produire de l'électricité grâce à la vapeur, provenant de la fission d'atomes d'uranium-235 bombardés de neutrons. L'uranium n'est fissile qu'en présence d'un modérateur. Dans le cas de l'uranium naturel, le modérateur doit nécessairement être de l'eau lourde.

Les centrales nucléaires sont plus dispendieuses à construire et à exploiter que les centrales thermiques conventionnelles. En revanche, elles ont l'avantage de coûter moins cher en combustible et de ne produire aucune pollution atmosphérique.

Énergie primaire : Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature et utilisée sans transformation : bois, charbon, pétrole, gaz naturel, uranium, pour les formes non renouvelables, hydraulique, solaire, éolienne, géothermique, marémotrice et la biomasse, pour les formes renouvelables.

Énergie renouvelable : Energie tirée d'une source renouvelable de manière permanente : biomasse, électricité hydraulique, énergie éolienne, solaire, géothermique, etc.

Équivalent carbone : Un kg de CO₂ contient 0,2727 kg de carbone. L'émission d'un kg de CO₂ vaut donc 0,2727 kg d'équivalent carbone.

Gaz à effet de serre (GES) : Gaz présents en faible quantité dans l'atmosphère qui absorbent une partie de l'énergie, réémise par la Terre et la conserve dans l'atmosphère, lui permettant d'avoir une température moyenne favorable à la vie. La forte augmentation des gaz à effet de serre produits par les activités humaines est la cause principale du changement climatique. Ces gaz produits par l'activité humaine sont principalement : le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), les oxydes nitreux (N₂O), l'ozone troposphérique (O₃).

Géothermie : Au sens strict : utilisation de l'énergie thermique des couches profondes de l'écorce terrestre. Plus largement : captage de la chaleur emmagasinée dans le sol à faible profondeur. L'origine de l'énergie est alors essentiellement solaire.

kWh, MWh : unité d'énergie produite par une installation, égale à la puissance de l'installation multipliée par la durée de fonctionnement en heures (par exemple : 1000 wattheure, égale à la consommation d'un appareil électrique de 1 000 watts fonctionnant pendant une heure).

Maîtrise de l'énergie : ensemble des mesures mises en œuvre pour une utilisation la plus efficace possible des ressources énergétiques. Ce terme englobe les économies d'énergie, l'utilisation rationnelle de l'énergie et les substitutions énergétiques

Méthanation : La méthanation est un procédé industriel de conversion catalytique du dihydrogène et du monoxyde de carbone en méthane.

Méthanisation : La méthanisation consiste en un traitement de déchets ou de matières organiques fermentescibles en l'absence d'oxygène (en milieu anaérobie). La méthanisation de matières organiques aboutit ainsi à la production de biogaz, composée principalement de méthane (55 à 60% CH₄) et de dioxyde de carbone (40 à 45 % CO₂) et contenant habituellement des traces d'hydrogène sulfuré (H₂S), gaz particulièrement toxique ;

Mix énergétique : Le Mix énergétique, ou bouquet énergétique, est la répartition des différentes sources d'énergie dans la consommation globale d'énergie d'un pays ou d'une zone géographique. La composition du mix énergétique varie pour chaque pays ou chaque région du monde.

Offshore : Offshore est un terme anglais désignant à l'origine les activités qui se déroulent au large des côtes, dont la recherche et l'exploitation de pétrole en mer.

Pile à combustible : Système qui produit simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une réaction chimique entre l'oxygène de l'air et l'hydrogène. L'hydrogène est un combustible qui peut être obtenu à partir de produits pétroliers, gaz naturel, alcool ou autres combustibles. La pile à combustible, dont le principe remonte à 1839, a été utilisée dans l'industrie spatiale pour les fusées Apollo et est expérimentée aujourd'hui aussi bien pour le chauffage que les transports.

Pointe (ou produit *peak*) : la pointe est la puissance maximum appelée sur un réseau électrique pendant une période donnée. Un produit pointe correspond à la fourniture d'une puissance électrique constante pendant les périodes de pointe (exemple : de 8 à 20 heures pour un produit pointe journalier).

Puits à la roue (du) : L'analyse de cycle de vie d'un biocarburant est dite du "puits à la roue" (ou WtW pour Well to Wheel) lorsque le bilan est fait en prenant en compte tous les éléments depuis l'extraction de la matière première jusqu'à son utilisation finale dans un véhicule.

Puits de carbone : Un puits de carbone se définit comme un réservoir de carbone qui, pendant un temps donné, absorbe globalement plus de carbone qu'il n'en rejette. La forêt et l'océan notamment sont appelés puits de carbone car ils absorbent le carbone dans le cycle de la biosphère.

Tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) : La tonne d'équivalent pétrole (TEP) est une unité de mesure de l'énergie couramment utilisée par les économistes pour comparer les énergies entre elles. L'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole moyen représente environ 11 600 kWh. Les Anglo-Saxons utilisent également le baril équivalent pétrole, ou BOE (barrel of oil equivalent) qui équivaut 0,135 tep environ, selon l'équivalence. 1 tep = 7,3 barils environ (le baril étant une mesure de capacité valant 159 litres).

Vecteur énergétique : Moyen de transport de l'énergie. Le principal est l'électricité, mais il est également possible d'utiliser l'hydrogène ou plus largement le gaz (le gaz pouvant être considéré à la fois comme une énergie primaire comme le gaz naturel, mais aussi comme un vecteur d'énergie quand il est produit à partir d'autres sources d'énergie comme c'est le cas pour la méthanation).