



Transition énergétique : stratégies d'innovation des groupes électriques européens

Stéphane Buttigieg

► To cite this version:

Stéphane Buttigieg. Transition énergétique : stratégies d'innovation des groupes électriques européens. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLED038 . tel-01493115

HAL Id: tel-01493115

<https://theses.hal.science/tel-01493115>

Submitted on 21 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'Université Paris-Dauphine

Transition énergétique : Stratégies d'innovation des
groupes électriques européens

École Doctorale de Dauphine — ED 543

Spécialité **Sciences économiques**

**Soutenue le 30.09.2016
par Stéphane BUTTIGIEG**

Dirigée par **Christian DE PERTHUIS**

COMPOSITION DU JURY :

M. Christian DE PERTHUIS
Université Paris-Dauphine
Directeur de thèse

Mme Béatrice DUMONT
Université Sorbonne Paris Cité
Rapporteuse

M. Jacques PERCEBOIS
Université Montpellier I
Rapporteur

M. Patrice GEOFFRON
Université Paris-Dauphine
Président du jury

M. Eric VANLABECK
OFI ASSET Manangement
Membre du jury

L'Université Paris-Dauphine n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses: ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

REMERCIEMENTS

La motivation profonde qui a guidé mon engagement dans ce projet de recherche relève du défi personnel et du dépassement des limites que je m'étais moi-même imposées. Rien ne me prédestinait, ni dans ma formation académique ni dans mon expérience professionnelle antérieure, à envisager la rédaction d'une thèse, qui plus est une thèse d'économie sur la transition énergétique. S'engager dans ce projet fut une décision inattendue, rendue possible grâce à la sérendipité. J'ai eu la chance de rencontrer des hommes et des femmes exceptionnels, atypiques et généreux à qui je veux rendre hommage pour m'avoir accompagné et soutenu durant cette aventure.

Tout d'abord, cette thèse a débuté par la rencontre avec Christian de Perthuis qui, le premier, m'a sensibilisé aux enjeux économiques du changement climatique. Malgré mon profil original pour m'engager dans la rédaction d'une thèse, Christian m'a accordé sa confiance. J'ai pris à son égard l'engagement de la mener jusqu'à son terme, sans, à l'époque, mesurer totalement l'ampleur du « pari ». Cet engagement a constitué un repère solide tout au long des cinq années nécessaires pour mener ce travail et particulièrement dans les moments les plus difficiles.

Ensuite, sur le plan académique, ma reconnaissance s'adresse à Patrice Geoffron et Marc Baudry. Patrice et Marc ont, chacun, su combiner exigence et bienveillance, rigueur et convivialité. Que ce soit par les concepts auxquels ils m'ont éveillé, ou leur capacité à articuler les idées, ils ont été inspirants par la finesse de leur analyse et la précision de leur propos. Mon regard sur la recherche et, plus généralement, sur la sphère académique a évolué à leur contact.

Cette thèse n'aurait pas non plus été possible sans le soutien d'André Lévy-Lang et Jean-Michel Beacco qui ont, tout d'abord, accueilli avec enthousiasme l'idée que je puisse m'engager dans ce projet en parallèle de mes activités à l'Institut Louis Bachelier, puis, m'ont permis de réunir les conditions pour la mener à bien. Jean-Michel a inculqué à l'Institut Louis Bachelier, qu'il dirige depuis 2010, une culture du risque « mesuré ». S'engager dans ce projet de recherche fut un moyen de sortir de ma zone de confort et d'explorer de nouveaux domaines. Je n'aurai certainement pas initié cette entreprise périlleuse sans le soutien indéfectible de Jean-Michel.

Enfin, je souhaite remercier Eric Van Labeck qui m'a accueilli au sein de l'équipe de recherche extra-financière d'OFI Asset Management (ex Macif gestion). Travailler durant trois ans à ses côtés, et au cœur de son équipe, m'a permis d'aligner mes travaux à des problématiques qui intéressent la profession et de les inscrire dans une perspective plus concrète.

Si mon environnement professionnel a constitué un terreau fertile pour permettre l'éclosion de ce projet, le soutien de différentes personnes au sein de la sphère privée a joué un rôle aussi déterminant.

Je pense en premier lieu à mes parents, Isabelle Peglion et Patrick Buttigieg qui, par leur Amour et leur éducation, m'ont donné le goût du travail, de la rigueur, de la persévérance. Ils m'ont accompagné au quotidien en partageant avec moi les doutes comme les joies. Mon parrain, Jean-Jacques Buttigieg qui, par les terribles épreuves qu'il a affronté, m'a aussi encouragé à trouver la force de me dépasser. Ma grand-mère qui est partie avant que je ne puisse finaliser mes travaux reste toujours présente à mes côtés. A tous, je leur dédie cette thèse.

Puis, à Vanessa Mendez, qui a partagé ma vie pendant cinq belles années et qui m'a « supporté » pendant ce long voyage. Elle m'a soutenu à chaque instant et m'a autant offert une écoute attentive que des recommandations bienveillantes. Vanessa a contribué à ce que ces travaux puissent être menés dans la sérénité.

J'aimerais également remercier : Patricia Crifo, pour avoir été, au côté de Christian de Perthuis, ma première directrice de thèse ; Elyes Jouini et Nicole EL Karoui pour m'avoir sensibilisé « au sens » de la recherche ; Charlotte Grasset avec qui j'ai voyagé d'Orléans au Sri Lanka et du Louvre au Street Art ; Christelle Thomas, Loic Herpin et Cyril Armange, qui ont suivi de près cette aventure ; Boris Solier et Raphael Trotignon pour leur disponibilité régulière ; mes équipes de l'Institut Louis Bachelier, celles de la Chaire Economie du Climat et d'OFI Assez Management ; mes amis fidèles à qui je n'ai malheureusement pas pu accorder suffisamment de temps durant ces dernières années. J'ajoute, enfin, une mention spéciale à Emilie Lafite pour son apport très précieux à la finalisation de ce travail.

A mes parents,

A ma famille,

A Ibrahim Wetakamba.

RESUME

En Europe, la transition énergétique du secteur électrique est unique à la fois d'un point de vue géographique et historique. D'une part, elle s'inscrit dans un double processus d'addition et de substitution technologique. Par ailleurs, elle appelle les électriciens à sortir du paradigme thermique et à mobiliser de nouvelles connaissances pour cela. L'objet de ce travail de recherche est de caractériser les stratégies d'innovation mises en œuvre au niveau des six plus importants électriciens européens (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE) et à l'échelle du secteur. En nous appuyant sur les brevets déposés entre 2007 et 2013 et sur les projets collaboratifs conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD, nous analysons les stratégies technologiques qui concernent la direction du progrès et les stratégies d'acquisition des connaissances qui concernent la démarche mobilisée par les électriciens pour introduire les technologies bas carbone. Nous mettons en évidence qu'à l'échelle du secteur, les technologies d'addition sont privilégiées aux technologies de substitution et que ces dernières font l'objet d'une démarche d'ouverture moins marquée que les technologies d'addition. En outre, il apparaît que les électriciens les plus émetteurs ne sont pas ceux qui mobilisent une stratégie de substitution technologique la plus marquée. En revanche, ils mettent en œuvre une démarche d'ouverture la plus prononcée pour acquérir les nouvelles connaissances.

Mots-clefs : transition énergétique, secteur électrique, brevets, stratégies d'innovation, coopération.

ABSTRACT

Innovation strategies of european utilities

In Europe, the energy transition of the power sector is unique both from a geographical and historical standpoint. First, it is part of a two-way process of technological addition and substitution. Furthermore, it calls power corporations to exit the thermal paradigm and, in this perspective, gain new knowledge. The purpose of this research work is to characterize the innovation strategies implemented by six of the major European power companies (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola and RWE) and by the industry. Based on the registeted patents between 2007 and 2013 and collaborative projects conducted in the frameword of the 7th PCRD, we will analyze the technology strategies relating to direction of progress and strategies relating to knowledge acquisition implemented by power companies in order to introduce low carbon technologies. We will highlight that at industry level, addition technologies are favoured in comparison with substitution technologies. We will also demonstrate that the latter shall be less prone to an open approach than addition technologies. Moreover, it seems that power companies with the largest emissions are not those who develop the most significant technology substitution strategy. However, they carry out the most openness based strategy in order to gain new knowledge.

Keywords : energy transition, power sector, patents, innovation strategy, coopetition

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	4
RESUME.....	7
ABSTRACT	8
INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE I - La transition énergétique dans une perspective historique.....	22
1. L'ère industrielle : Approche historique et théorique de l'énergie	25
1.1 Caractérisations saillantes des transitions énergétiques de l'ère industrielle.....	25
1.1.1 Un mécanisme d'addition énergétique.....	26
1.1.2 Des transitions à intervalles rapprochés	28
1.2 La dynamique de la diffusion des technologies énergétiques	31
1.2.1 Un processus d'addition technologique.....	33
1.2.2 La diversification des besoins énergétiques	38
1.3 La place des autorités publiques dans les transformations énergétiques	44
1.3.1 La sécurité énergétique	45
1.3.2 La régulation de la concurrence	48
1.4 Conclusion.....	53
2. La transition « bas carbone » déroge aux observations des transformations historiques ..	54
2.1 Une transition sous contrainte de temps nécessitant des politiques publiques inédites	55
2.2 Le cas du secteur électrique en Europe	60
2.2.1 Vers une nouvelle dynamique de diffusion des technologies énergétiques	61
2.2.2 Focus sur cinq domaines technologiques bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique	66
3. Conclusion	72
CHAPITRE II –La transition énergétique bas carbone au prisme de l'analyse des transitions technologiques	74
1. Le secteur électrique face à la nécessité d'un changement d'architecture dominante	75

1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique	75
1.2 Les contraintes spécifiques à l'introduction des technologies bas carbone dans le secteur électrique.....	78
2. Les leviers favorisant l'introduction des technologies bas carbone par les électriciens	82
2.1 L'intervention des autorités publiques.....	82
2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales	90
3. Conclusion.....	96
CHAPITRE III - Un cadre d'analyse pour caractériser les stratégies d'innovation du secteur électrique.....	97
1. Délimitation d'un cadre d'analyse.....	98
2. Présentation des données.....	104
2.1 Le périmètre des électriciens retenus	104
2.2 Le choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxys de l'innovation	104
3. Présentation de la méthodologie.....	110
3.1 Retraitement des données	110
3.1.1 Retraitement des projets collaboratifs	110
3.1.2 Retraitement des brevets	116
3.1.2 Modalité d'analyse de la stratégie technologique des électriciens et du secteur	119
3.1.2 Modalité d'Analyse de la stratégie d'acquisition des connaissances des électriciens et du secteur	121
4. Conclusion.....	127
CHAPITRE IV- Etudes de cas : Une approche par domaine technologique	129
1. Comparaison des domaines technologiques.....	131
2. Analyse des domaines technologiques.....	145
2.1 Les domaines relevant de l'addition technologique	146
2.1.1 La fission nucléaire	147
2.1.2 Le captage et le stockage du carbone	154
2.1.3 Les smart grids	161
2.1.4 Conclusion	173

2.2 Les domaines relevant de la substitution énergétique	175
2.2.1 L'hydrogène	176
2.2.2 Les énergies renouvelables.....	184
2.2.3 Conclusion	196
3.Conclusion.....	198
CHAPITRE V – Analyse des stratégies d'innovation des électriciens européens	201
1. Comparaison des électriciens	204
2. Etudes de cas.....	208
2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique	209
2.1.1 L'Allemagne : « l'Energiewende » en marche pour un engagement résolu en faveur des énergies renouvelables	211
2.1.2 La France : un modèle de bouquet énergétique décarboné et compétitif.....	215
2.1.3 Le secteur de l'électricité en Italie, un marché en crise.....	217
2.1.4 L'Espagne, leader dans l'éolien	218
2.1.5 Conclusion	221
2.2 Electricité de France	223
2.2.1 Les enjeux de la transition énergétique	223
2.2.2 Stratégie d'innovation	226
2.2.3 Conclusion	233
2.3 Enel	234
2.3.1 Les enjeux de la transition énergétique	234
2.3.2 Stratégie d'innovation	236
2.3.3 Conclusion	244
2.4 E.ON	245
2.4.1 Les enjeux de la transition énergétique	245
2.4.2 Stratégie d'innovation	247
2.4.3 Conclusion	253
2.5 Engie.....	255
2.5.1 Les enjeux de la transition énergétique	255

2.5.2 Stratégie d'innovation.....	257
2.5.3 Conclusion	263
2.6 Iberdrola.....	264
2.6.1 Les enjeux de la transition énergétique	264
2.6.2 Stratégie d'innovation	266
2.6.3 Conclusion	273
2.7 RWE.....	275
2.7.1 Les enjeux de la transition énergétique	275
2.7.2 Analyse de la stratégie d'innovation	278
2.7.3 Conclusion	286
3. Conclusion.....	287
3.1 L'analyse des stratégies technologiques	287
3.2 L'analyse des modalités d'acquisition des connaissances	290
CONCLUSION GENERALE.....	293
ANNEXES	302
Annexe 1 : Hypothèses retenues pour le calcul du cout de l'électricité dans l'étude Lazard (2014)	303
Annexe 2 : Le cas de l'éclairage en Angleterre - Comparaison de l'évolution du prix de l'énergie à celui de l'éclairage	306
Annexe 3 : Présentation du projet Advanced dans la base Cordis.....	308
Annexe 4 : Liste des filiales des électriciens à partir desquelles les projets ont été collectés	309
Annexe 5 : Liste des déposants à partir desquels les brevets ont été extraits de la base cordis	310
Annexe 6 : Principaux déposants de brevets dans les domaines technologiques étudiés (hors nucléaire).....	311
Annexe 7 : Méthodes de production et de stockage de l'hydrogène.....	313
BIBLIOGRAPHIE.....	315

INTRODUCTION GENERALE

Au cours du XXI^{ème} siècle, l'humanité devra relever le défi de la lutte contre le dérèglement climatique. Si la température augmentait de plus de 2°C au terme de ce siècle par rapport à l'ère préindustrielle, on assisterait à une recrudescence de phénomènes tels que l'augmentation du niveau des mers, la raréfaction des ressources en eau ou la multiplication d'événements extrêmes aux coûts économiques et sociaux considérables. L'Accord de Paris adopté lors de la 21^{ème} Conférence des Parties appelle même à poursuivre les efforts pour « limiter l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels » (Article 2).

Le GIEC a étudié, dans ses rapports successifs, le lien entre les activités humaines et les menaces de dérèglements climatiques en démontrant le rôle des émissions de gaz à effet de serre. En 2013, les émissions de gaz à effet de serre atteignaient 54 Gt CO₂eq (MEDDE et I4CE, 2015), et parmi ces émissions globales, les émissions de CO₂ résultant de l'utilisation des énergies fossiles représentent plus de 60 % du total mondial et constituent, de loin, la première source anthropique du réchauffement. Selon l'AIE (2014a), la poursuite de la trajectoire de croissance actuelle de ces émissions pourrait conduire à une augmentation de la température supérieure à 5°C d'ici la fin du siècle. D'où la nécessité d'engager une transition énergétique inédite dans l'histoire humaine pour réduire massivement ces émissions liées à l'usage des énergies fossiles.

L'histoire a régulièrement conduit à observer des dégradations locales de l'environnement dues à l'usage de l'énergie. Ces contraintes ont été prises en compte dans le cadre de transitions énergétiques passées reposant sur l'addition de nouvelles sources d'énergies à celles existantes. Ces transitions séculaires observées par Smil (2010) se sont opérées suivant une logique d'additivité technologique dans laquelle les nouvelles technologies se diffusent sans pour autant entraîner une diminution de l'usage des technologies établies. De par son caractère global, le changement climatique appelle à des transitions conduites à une autre échelle, ce qui requiert de repenser structurellement les systèmes énergétiques. Dans cette mutation qui touchera les énergies primaires utilisées, les procédés de conversion mais aussi les usages, une partie des nouvelles technologies viendront supplanter les technologies existantes. C'est pourquoi l'introduction et la diffusion de technologies « bas carbone » dans le système énergétique, processus généralement qualifié de « transition énergétique », gagne à s'étudier dans le cadre des changements technologiques suivant le double prisme d'additivité et de substituabilité.

Le secteur électrique européen et la transition énergétique

Parmi les secteurs concernés par la combustion d'énergie (transport, bâtiment, agriculture, industrie), celui de la production d'électricité, qui repose à hauteur de 64% sur les énergies fossiles (AIE, 2015a), mérite une attention particulière. En 2013, avec une contribution à hauteur de 38% des émissions de CO₂ liées à l'énergie (AIE, 2015c), le secteur électrique a

constitué la première source anthropique d'émission dans le monde. Selon de nombreux scénarios de long terme (AIE, 2015b, CE, 2011b), c'est donc sur ce secteur que doit porter une partie conséquente des efforts de réduction. En Europe, les objectifs sont d'atteindre une neutralité carbone du secteur vers 2050 en sortant notamment des technologies utilisant du charbon qui restent dominantes dans un grand nombre de pays. Cette transition bas-carbone ne s'effectuera cependant pas de façon spontanée :

- Le charbon, qui, en 2014, représentait 41% du mix électrique mondial selon l'AIE (2015a), affiche un coût particulièrement compétitif, avec des centrales âgées amorties ou des centrales récentes plus coûteuses mais plus efficaces. Cet avantage compétitif continue de prévaloir en Europe plus de onze ans après le démarrage du système d'échange de quotas de CO₂ dont l'un des principaux objectifs était d'inverser les rentabilités respectives des centrales à charbon et des centrales à gaz.
- Le secteur électrique doit faire face à des contraintes spécifiques d'équilibre en temps réel. Une nécessité d'autant plus difficile à gérer dans un contexte d'intégration croissante d'électricité renouvelable, intermittente par nature, et d'extension du parc de véhicules électriques. Le mode de développement de ces énergies renouvelables en Europe a fortement perturbé le fonctionnement des marchés électriques dont la libéralisation était l'un des grands objectifs de la politique énergétique commune.
- Le secteur électrique européen traverse une crise profonde qui le conduit à se restructurer et questionne la capacité de ses acteurs historiques à réaliser la transition bas-carbone. Cette crise trouve son origine dans la diminution de la demande assortie d'une situation de surcapacité des unités de production largement provoquée par l'augmentation des capacités renouvelables. L'injection de l'électricité d'origine renouvelable étant prioritaire dans le réseau, les centrales thermiques sont moins sollicitées, bien qu'indispensables en période de pointe. Cette dynamique met à mal l'organisation du marché électrique et conduit à une baisse générale de la rentabilité des groupes électriques qui doivent se restructurer.
- De plus, la libéralisation des marchés a conduit à limiter les dépenses de R&D des groupes électriques européens, ce qui, cumulé à la situation de crise qu'ils traversent, interroge leur capacité à générer en interne l'innovation bas carbone. Jamasb et Pollit alertaient déjà, au milieu des années 2000, sur les conséquences de ces réductions susceptibles « d'affecter négativement le développement d'innovation dans le long terme » (Jamasb et Pollit, 2006). Sur la période 2007-2013, l'intensité R&D moyenne, qui mesure le budget R&D rapporté au chiffre d'affaires sur la période considérée, varie de 0,1% pour Enel et E.ON à 0,7% pour EDF, soient des niveaux plutôt bas par rapport à ceux observés avant la libéralisation de l'électricité.
- Les procédés qui permettent de décorréliser les émissions de la production électrique sont des innovations environnementales. Dans la mesure où toute une variété de segments et d'acteurs sont impactés par leur introduction, elles sont plus systémiques que les innovations classiques (Theyel, 2006; Seuring et Müller, 2008). Cela signifie

que ces transformations exigeront des acteurs du secteur électrique qu'ils déploient des formes nouvelles de coopérations aboutissant à une reconfiguration de l'ensemble du secteur.

S'il ne fait aucun doute que la décarbonation du secteur électrique européen à l'horizon 2050 est une condition majeure de réussite de la transition énergétique, les conditions dans lesquelles s'opèrent les premières étapes du mouvement interrogent sur la capacité des grands acteurs du secteur à opérer les mutations technologiques requises. C'est à cette question de recherche qu'a choisi de s'attacher cette thèse.

La question de recherche : quelles stratégies d'innovation pour réussir la transition énergétique dans le secteur électrique européen ?

Dans le contexte de la transition énergétique en Europe, les groupes électriques devront constituer des portefeuilles technologiques bas carbone, ce qui les contraint à acquérir de nouvelles connaissances sur toute une variété de domaines technologiques. Nos travaux ont porté sur l'analyse de cinq domaines technologiques. Certains relèvent de la substitution (énergies renouvelables et hydrogène) et d'autres de l'addition (captage et stockage du carbone, fission nucléaire, smart grids). Ces domaines ne sont pas exhaustifs mais couvrent différents segments de la chaîne de valeur électrique.

L'analyse des stratégies d'innovation porte sur les six plus importantes compagnies électriques européennes (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE) et est également conduite à l'échelle du secteur. Pour ce faire, nous nous sommes interrogés, d'une part, sur l'orientation des stratégies technologiques développées et d'autre part sur les caractéristiques des stratégies d'acquisition des nouvelles connaissances mises en œuvre.

Les stratégies technologiques posent la question de la direction du progrès poursuivie par les opérateurs électriques. Pour réussir sa transition, l'Union européenne doit engager un double processus d'addition et de substitution énergétique, le charbon ayant vocation à être remplacé à horizon 2050 (CE, 2011b) par les énergies renouvelables. Nous nous interrogeons donc sur l'intensité de l'engagement des opérateurs électriques dans les innovations bas carbone retenues dans notre périmètre d'analyse et cherchons à discerner si leur stratégie s'oriente plutôt vers les technologies d'addition ou celles de substitution (Fressoz, 2012).

Les stratégies d'acquisition des connaissances reflètent la démarche mise en œuvre par les électriciens pour introduire les technologies bas carbone, et en particulier la question cruciale de leur degré d'ouverture. Dans la mesure où les innovations environnementales s'appuient, pour la plupart, sur des connaissances différentes de celles accumulées jusqu'à présent par les électriciens, une démarche d'innovation ouverte (Chesbrough, 2006) devrait faciliter leur acquisition. D'autant plus que les innovations environnementales sont de nature plus systémiques que les innovations classiques (Theyel, 2006; Seuring et Müller, 2008) : étant donné que l'introduction de ces innovations impacte une large variété d'acteurs, collaborer apparaît logiquement comme l'un des facteurs susceptibles de la faciliter. Pour apprécier le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances, trois critères ont été

retenus : le niveau de co-construction de l'innovation qui permet d'identifier si l'électricien est plutôt un adopteur ou plutôt un générateur de technologie (Hollanders, 2007), le niveau de coopération qui mesure l'intensité des collaborations avec les compétiteurs dans le but de favoriser la diffusion des connaissances et de définir collectivement les nouveaux standards (Nalebuff et Brandenburger, 1996) et le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants qui permet d'apprécier dans quelle mesure les électriciens s'appuient sur des actifs complémentaires (Tripsas, 1997).

Pour guider notre démarche, nous avons été conduit à poser quatre hypothèses de départ et seront ensuite testées au moyen d'une analyse empirique et de la construction d'études de cas.

Une approche qui teste quatre hypothèses tirées de la littérature économique

Plusieurs courants parcourent l'économie de l'innovation. Dans l'approche néo-classique, les bonnes incitations économiques transmises par le signal-prix en ce qui concerne la correction des externalités environnementales ou, par d'autres instruments, pour valoriser les externalités liées à la diffusion des connaissances, constituent les moteurs des transitions technologiques. Nous nous situons plutôt ici dans une approche basée sur le courant évolutionniste qui repose sur l'idée de « variation – sélection – réplication » ; un courant qui fait écho à la situation que connaissent les groupes électriques dans le contexte actuel de transition énergétique - et dont s'inspire fortement la méthodologie mise en place pour caractériser les stratégies d'innovation :

- alors qu'une profusion de technologies bas carbone est disponible pour diminuer les émissions de CO₂, les groupes électriques devront modifier leur trajectoire technologique en sélectionnant des technologies bas carbone en « compétition » (Dosi, 1982 ; Unruh, 2000 ; Abernathy et Utterback, 1975) les uns avec les autres. Ainsi, analyser les stratégies et apprécier les portefeuilles technologiques consiste à examiner l'issue du processus de sélection.
- les innovations environnementales sont plus systémiques que les innovations classiques (Theyel, 2006; Seuring et Müller, 2008) ce qui met les électriciens dans l'obligation de collaborer avec leur écosystème pour les introduire. Or, analyser les stratégies d'acquisition des connaissances consiste précisément à apprécier la place des collaborations dans le processus d'innovation : le courant évolutionniste est donc particulièrement adapté à cette démarche puisque l'idée de variation et de sélection permet de tenir compte des interactions avec l'environnement.

Pour caractériser les stratégies d'innovation, nous avons au départ posé quatre hypothèses, tirées de la littérature, que nous allons ensuite soumettre à des tests empiriques. Ces hypothèses sont les suivantes :

- *Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.*

- *Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition.*
- *Hypothèse 3 : les groupes électriques dont l'intensité carbone est la plus élevée font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs.*
- *Hypothèse 4 : les groupes électriques dont l'intensité carbone est la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre la démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte.*

Pour tester ces hypothèses inspirées de la littérature, nous avons procédé à une étude empirique basée sur l'exploitation de deux bases de données.

Une approche empirique fondée sur l'exploitation de deux bases de données sur les brevets et les projets collaboratifs

Pour analyser la stratégie technologique et la stratégie d'acquisition des connaissances, la question de l'accès aux informations est cruciale. Les informations délivrées par les acteurs sont partielles et hétérogènes et d'une utilisation difficile par le chercheur.

Notre démarche propose de privilégier deux sources indépendantes d'information : la base Patstat qui nous renseigne sur les brevets¹ déposés par les groupes électriques entre 2007 et 2013 ; la base Cordis qui permet de documenter les projets menés dans le cadre du 7^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement² sur la même période.

Au total, les compagnies électriques ont déposé 891 brevets sur la période considérée et participé à 152 projets collaboratifs associant 1293 acteurs différents³. Cependant, notre analyse a porté exclusivement sur les projets et les brevets concernant les cinq domaines technologiques étudiés, soit 280 brevets et 126 projets. Le coût total des projets atteint 1,96 Md€, financé à hauteur de 57% par la Commission européenne.

Assurément, la combinaison des brevets et des projets menés à l'occasion du 7^{ème} PCRD ne permet pas d'accéder à la totalité de l'innovation des électriciens. Car la totalité de la propriété intellectuelle produite par les électriciens n'est pas nécessairement protégée par un brevet. De la même façon, d'autres projets collaboratifs, financés ou non par les pouvoirs

¹ Y compris les brevets verts, selon la classification proposée par l'Inventaire vert de l'OMPI.

² Le PCRD est un instrument économique de type « technology push » mis en place par la Commission européenne dans le but de cofinancer des projets d'innovation collaborative et favoriser la création de nouvelles connaissances en réduisant le risque technologique.

³ Certaines organisations pouvant participer à plusieurs projets, la somme des partenaires des projets excède ce chiffre.

publics, sont susceptibles d'être conduits par les électriciens en sus de ceux développés dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Nous ne prétendons pas disposer des données exhaustives pour caractériser les stratégies d'innovation. Néanmoins, les bases Patstat et Cordis donnent accès à des sources normées cohérentes en vue d'analyser les stratégies d'innovations selon les axes retenus (stratégie technologique et stratégie d'acquisition des connaissances) et d'établir une comparaison entre électriciens.

La combinaison de ces deux proxys de l'innovation permet de :

- *comparer les électriciens* sur une base fiable et identique autorisant la construction de six études de cas sur chacun des groupes électriques considérés,
- *mesurer l'intensité de leur engagement* dans les cinq domaines technologiques retenus, grâce à la construction d'un indicateur quantitatif qui est utilisé dans chaque étude de cas,
- *mesurer l'intensité des collaborations et donc le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances* selon les critères retenus, grâce à la construction d'un second indicateur également utilisé pour les études de cas.

La partie empirique de notre travail, destinée à tester les hypothèses de la littérature repose donc sur la confection d'études de cas, construites à partir d'indicateurs quantifiés et normés issue des deux bases de données sur les brevets et les projets collaboratifs menés à l'occasion du 7^{ème} PCRD.

Organisation de la thèse

La thèse est organisée en cinq chapitres :

Le chapitre I propose une analyse historique des transitions énergétiques destinée à cerner les singularités de la transition bas carbone actuelle et les enjeux spécifiques du secteur électrique.

Les précédentes transitions énergétiques se sont déroulées « naturellement », sans incitation particulière des pouvoirs publics, et dans des délais de l'ordre d'un siècle (Grubler, 2011). Elles se sont caractérisées par :

- *un processus d'addition énergétique* (Fressoz, 2012) induit par la création de nouveaux marchés qui a conduit à l'augmentation continue de la demande énergétique (Fouquet, 2009),
- *un processus d'addition technologique concomitant au processus d'addition énergétique*. Le progrès technique a permis, d'une part, de prendre en intrant une gamme de plus en plus large d'énergies primaires et a conduit, d'autre part, à la

diminution du prix des services énergétiques et à l'augmentation des usages (Grubler, 2012) encourageant de ce fait l'augmentation de la demande en énergie.

Lors des précédentes transitions, la demande énergétique a été satisfaite par différentes évolutions technologiques. Or, l'objectif de la transition bas carbone consiste à répondre à un problème d'externalités. Il ne s'agit ni de satisfaire à de nouveaux besoins énergétiques, ni de créer de nouveaux services énergétiques, mais de limiter les externalités négatives des émissions. La transition bas carbone se singularise donc de celles qui l'ont précédé dans l'histoire, et particulièrement pour le secteur électrique.

Dans le chapitre II, nous déterminons pourquoi la transition technologique nécessaire pour parvenir à une économie sobre en carbone du secteur électrique est différente des transitions technologiques « classiques ». Cette étape permet d'identifier les leviers susceptibles de favoriser l'introduction des technologies bas carbone.

Usuellement, la diffusion de technologies fondées sur de nouvelles connaissances procure aux innovateurs un avantage compétitif. Cependant, leur diffusion est confrontée à différents obstacles (risques de marché, compétition avec les technologies déjà établies) si bien que leur succès n'est pas garanti. Des expérimentations au sein de niches de marché permettent d'en pallier certains risques en suscitant des interactions entre producteurs et utilisateurs. Pour favoriser l'introduction des technologies bas-carbone par les électriciens, deux leviers complémentaires, l'un exogène et l'autre endogène, sont donc susceptibles d'être mobilisés.

La mise en place par une autorité publique d'un signal-prix visant à orienter le progrès technique constitue un levier exogène. Dans le cas où ni la valeur du bénéfice social des innovations environnementales, ni les coûts des externalités ne seraient internalisés, il n'existerait aucune raison économique pour qu'un électricien diverge de sa trajectoire thermique pour introduire des innovations bas carbone. Le signal-prix permet de partager le risque et d'inciter ainsi à innover.

Les collaborations avec les parties prenantes constituent un moyen endogène d'acquérir de nouvelles connaissances, qui prend en compte le caractère systémique des innovations environnementales et les interactions qu'elles nécessitent. Trois types de collaborations présentent un intérêt particulier : la co-construction de l'innovation qui consiste à innover en collaboration avec des parties prenantes externes à la firme plutôt que de les générer en interne, les collaborations avec les nouveaux entrants qui apportent des actifs complémentaires et les collaborations avec les concurrents (« coopétition ») qui permettent une définition commune des standards et facilitent la réponse à un problème commun. La suite du travail porte sur ce levier endogène.

Dans le Chapitre III, nous formalisons le cadre d'analyse des stratégies d'innovation bas carbone du secteur électrique analysées sous le double prisme de la stratégie technologique et la stratégie d'acquisition des connaissances.

Pour conduire les études de cas, nous analysons les projets initiés dans le cadre du 7^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement (7^{ème} PCRD) de la Commission européenne par les électriciens ainsi que les brevets qu'ils ont déposés entre 2007 et 2013.

Ces deux proxys de l'innovation permettent à la fois de tenir compte des moyens d'élaboration de solutions technologiques nouvelles (via les projets) et du résultat de ces efforts (via les brevets).

Sur la base des brevets et des projets, nous construisons un premier indicateur synthétique permettant de mesurer l'intensité de l'engagement pour une technologie donnée et un second qui permet d'apprécier le niveau de la démarche d'ouverture mise en œuvre pour acquérir de nouvelles connaissances. Ce second indicateur s'articule autour des trois axes suivants : la « co-construction de l'innovation » qui mesure le niveau de collaboration externe par rapport à la génération interne d'innovation, la « collaboration avec les nouveaux entrants » qui mesure la part de projets menés avec significativement plus de nouveaux entrants que les autres projets, et la « coopération » qui mesure le niveau de collaboration avec les concurrents .

Les chapitres IV et V sont consacrés aux études de cas et sont articulés de façon identique.

Le chapitre IV est consacré à l'analyse des cinq domaines technologiques retenus en s'intéressant spécifiquement aux tendances d'innovation à l'échelle du secteur électrique. Pour conduire une analyse à cette échelle, l'ensemble des données « brevets » et « projets » des six groupes électriques sont agrégées.

Nous procéderons à la comparaison des domaines technologiques entre eux afin de tester nos deux premières hypothèses de travail :

- *Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.*
- *Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition.*

Dans le chapitre V, les études de cas portent sur les six groupes électriques retenus dans notre périmètre. L'analyse cherche à caractériser les stratégies d'innovation de chacun en fonction de l'intensité de son engagement sur les différents domaines technologiques et de son niveau d'ouverture dans la démarche d'acquisition des connaissances. Cette approche permet de tester les deux dernières hypothèses de travail :

- *Hypothèse 3 : les électriciens dont l'intensité carbone est la plus élevée font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs.*
- *Hypothèse 4 : les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre la démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte.*

En conclusion nous nous interrogeons sur la portée des résultats obtenues, et notamment leur utilisation possible pour comprendre le rôle respectif des acteurs historiques et des nouveaux entrants dans les mutations technologiques requises pour réussir la transition énergétique.

CHAPITRE I - LA TRANSITION ENERGETIQUE DANS UNE PERSPECTIVE HISTORIQUE

Le débat sur la « transition » destinée à transformer le fonctionnement des systèmes énergétiques s'inscrit dans un contexte historique inédit. Certes, l'histoire a régulièrement été marquée par des dégradations environnementales provoquées par les activités énergétiques, comme les épisodes de déforestation au XIX^{ème} (du fait de l'utilisation excessive de la biomasse) ou lors de marées noires au XX^{ème}. Cependant, nous sommes désormais face à un changement d'échelle, les effets dépassant aujourd'hui ceux observés par le passé, dès lors que leur impact menace la stabilité du climat terrestre.

La préoccupation première est celle de la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (GES)⁴, dont la concentration excessive dans l'atmosphère induit une augmentation des températures terrestres. A l'échelle mondiale, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dues à la combustion d'énergies fossiles atteignaient 32,2 Gt CO₂ en 2013 (AIE, 2015), soit une progression d'environ 30% depuis 2000.

La lutte contre le réchauffement climatique passe donc, nécessairement, par une transformation profonde des systèmes énergétiques, systèmes définis par Smil (2008) comme un ensemble composé de sources d'énergies naturelles, d'un système de conversion et d'une variété d'usage spécifique des flux d'énergie disponible. Cette perspective, généralement qualifiée de « transition énergétique », suppose la modification progressive du mix énergétique (dans lequel les énergies « carbonées » doivent graduellement s'effacer au profit de celles « non ou faiblement carbonées »), assortie d'une évolution des systèmes de conversion.

Toutefois, comme le souligne Christian de Perthuis (2013), le concept de transition énergétique varie en fonction des régions du monde. Aux Etats-Unis, la transition énergétique « consiste avant tout à réduire la dépendance du pays à l'égard des hydrocarbures importés depuis le Proche-Orient » (page 3). L'idée de transition énergétique permet ici de justifier l'exploration d'énergies dites « non conventionnelles » dont les techniques d'extraction (en particulier la fracturation hydraulique) font l'objet de controverses. Notons au passage que c'est aux Etats-Unis, pendant la crise énergétique des années 1970, que l'expression « transition énergétique » a été popularisée par Jimmy Carter afin d'encourager ses concitoyens à renoncer au consumérisme (Fressoz, 2014). Les Etats-Unis ne sont pas la seule région du monde à proposer une définition alternative de la transition énergétique. Dans les pays émergents, la transition énergétique vise à « assurer les approvisionnements nécessaires pour répondre aux besoins de l'industrialisation ». Il ne s'agit donc pas là de limiter l'usage des ressources carbonées, mais plutôt de réunir les conditions nécessaires pour disposer de la quantité d'énergie requise pour assurer la croissance économique.

⁴ Les sept gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique sont les suivants : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, hydrofluorocarbure, perfluorocarbure, hexafluorure de soufre et trifluorure d'azote.

Si l'actuelle transition est la première volontairement mise en œuvre pour combattre le réchauffement climatique, elle n'est pas la première transformation énergétique de l'histoire. Des précédents historiques vont nous permettre d'analyser la dynamique en cours, à la lumière des mécanismes observés dans le passé.

Selon Smil (2008), on dénombre trois transitions énergétiques majeures. Tout d'abord, au XI^{ème} siècle, le passage de l'usage de l'énergie humaine et animale à celui de l'énergie mécanique, grâce aux moulins à vent et à eau, (constituant un premier recours aux énergies renouvelables). Ensuite, le remplacement des mouvements mécaniques par des machines à vapeur au XVIII^{ème} siècle et l'émergence du charbon. Enfin, au milieu du XX^{ème} siècle, la troisième transition se caractérise, à la fois, par l'expansion des usages de l'électricité et l'essor du pétrole pour les transports.

Une perspective historique utile mais trop parcellaire pour éclairer de manière pertinente les bouleversements liés à l'énergie dans nos sociétés industrielles. Il paraît plus judicieux de se pencher sur les transitions de l'époque contemporaine mises en évidence par Fouquet (2008). Avec l'émergence de nouvelles énergies primaires (charbon, pétrole et gaz) puis d'énergies secondaires comme l'électricité, on a, en effet, assisté depuis 1800 à une succession de transitions qui ont vu la mise en place des nouveaux systèmes énergétiques encore d'actualité.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'histoire de l'énergie des deux derniers siècles qui permet d'établir un certain nombre de constats, dont certains sont relativement surprenants. Tout d'abord, il apparaît que les transitions énergétiques ont été réalisées dans un contexte de croissance de la consommation d'énergie et selon un processus d'additions successives. Bien que les transitions soient des phénomènes lents (de l'ordre d'un siècle), leur durée s'est progressivement réduite. De plus, on observe que la transition s'est systématiquement faite au bénéfice d'énergies dont le coût, au moment de leur introduction, était supérieur à celui des énergies établies. Afin de comprendre pourquoi les transitions ont opéré selon cette logique, nous examinerons ensuite l'influence des mécanismes de marchés sur ces transitions et sur l'évolution du système électrique et tout particulièrement le rôle joué par l'offre technologique et la demande d'énergie. Enfin, se pose la question de la place occupée par les pouvoirs publics depuis le début du XX^{ème} siècle dans le domaine énergétique. Si les Etats ont contribué à accompagner et encadrer le développement de l'énergie, notamment en régulant les monopoles naturels tels que le transport de l'électricité, et en veillant à assurer la sécurité des approvisionnements énergétiques, on constate qu'ils n'ont que rarement pris part à l'impulsion des différentes transitions énergétiques.

Dans un second temps, nous mettrons en évidence la singularité de la transition énergétique actuelle et, en particulier, le cas du secteur électrique européen. Au regard de l'urgence de lutter contre le réchauffement climatique, les pouvoirs publics doivent coopérer à l'échelle internationale. Des mesures qui, pour la première fois, peuvent conduire à la nécessité d'instaurer un signal-prix afin de modifier le comportement des acteurs et les orienter vers des technologies moins émettrices. De plus, nous verrons que la transition énergétique du secteur électrique ne pourra s'inscrire dans le schéma des mécanismes économiques observés ces

deux derniers siècles : c'est l'offre technologique qui permettra de décorrélérer la production des émissions de CO₂.

Au final, c'est non seulement la manière de produire, mais également de transporter, de distribuer et de consommer de l'énergie qui est remise en question, et cela sur un horizon de temps assez court.

1. L'ERE INDUSTRIELLE : APPROCHE HISTORIQUE ET THEORIQUE DE L'ENERGIE

Depuis 1800, deux révolutions industrielles ont bouleversé le paysage socio-économique. La première a vu la mutation d'une société à dominante agraire et artisanale vers une société commerciale et industrielle grâce au développement de l'acier, des transports ferroviaires et des premières usines mécanisées. La seconde, généralement située entre 1870 et 1910, est caractérisée par de grandes innovations à l'origine d'importants gains de productivité et d'une forte croissance économique. L'économie se modernise et se structure progressivement autour de grandes firmes industrielles, avec de nouvelles formes d'organisation du travail comme le taylorisme.

Ces deux révolutions ont été associées à un recours croissant à l'énergie dont la consommation mondiale a été multipliée par cent (Fouquet et Pearson, 2012). L'entrée dans l'ère industrielle se caractérise par une véritable reconfiguration du système énergétique liée à l'introduction successive de nouvelles énergies primaires et à de nouveaux procédés de conversion. Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz, uranium) se sont tour à tour imposées en une succession de transitions énergétiques, proposant chaque fois une gamme plus vaste d'usages. Le progrès technique a joué un rôle déterminant dans ces transitions : de nouveaux procédés, fondés sur la combustion de ces énergies fossiles, et dont les performances se sont améliorées au fil du temps, ont permis de générer toujours plus d'énergie finale. L'histoire de l'énergie des deux cents dernières années a également vu la généralisation d'une énergie secondaire, l'électricité créée par transformation d'énergies primaires. Afin de caractériser la dynamique des transitions, nous examinerons le rôle joué par les mécanismes de marché et les autorités publiques, en particulier dans le périmètre des systèmes électriques.

1.1 CARACTERISATIONS SAILLANTES DES TRANSITIONS ENERGETIQUES DE L'ERE INDUSTRIELLE

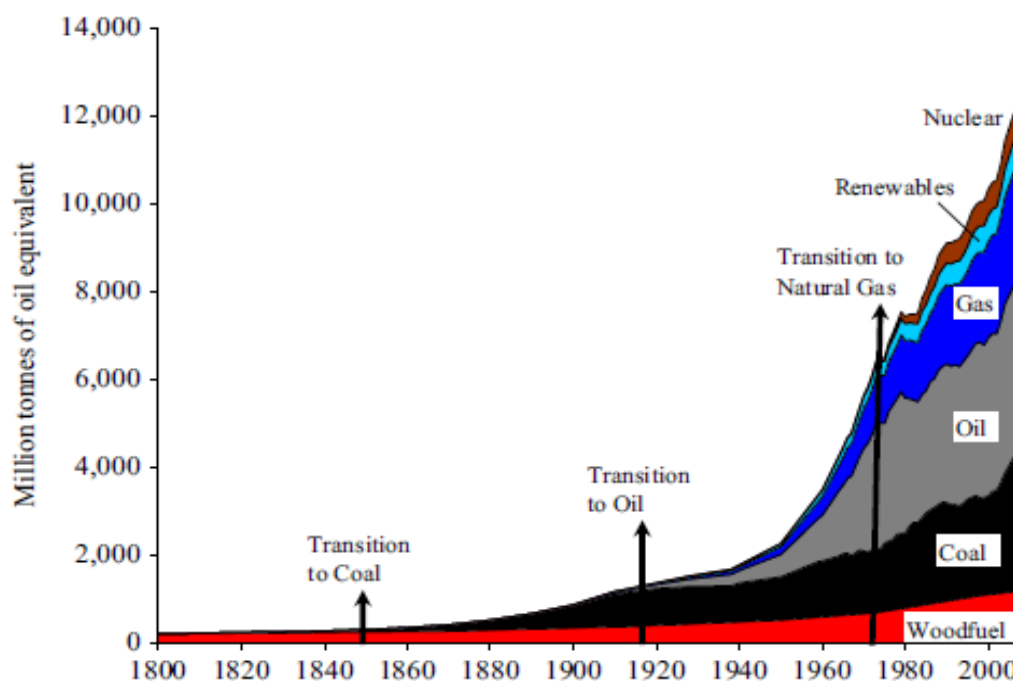
Depuis 1800, de plus en plus d'énergies primaires (charbon, pétrole, gaz, et dans une moindre mesure, uranium et renouvelables) ont été combinées pour composer le mix énergétique mondial actuel. Nous présenterons dans cette section un panorama de l'évolution de la consommation de chacune des énergies primaires fossiles : charbon, pétrole et gaz, en caractérisant le processus par lequel elles ont émergé tout en restant attentifs à leur coût d'introduction. De plus, nous documenterons la formation du coût de l'électricité en mettant en évidence, d'une part, la variété des énergies primaires permettant de la générer et, d'autre part, l'écart de coût de production en fonction de ces différentes énergies.

1.1.1 Un mécanisme d'addition énergétique

La demande mondiale d'énergie qui représentait 20 Exa Joule en 1800, est aujourd'hui de l'ordre de 400 EJ. En 200 ans, le monde est passé d'une ère de pénurie à une ère « d'abondance énergétique » (Grubler, 2012), rendue possible par ce que Madureira (2012) qualifie de « banque énergétique », soit le carbone accumulé depuis des centaines de millions d'années et stocké sous forme fossile. C'est la combustion de ces ressources fossiles riches en carbone (pétrole, gaz et charbon) qui permet de libérer l'énergie. Signalons que les énergies fossiles sont qualifiées d'énergies "non renouvelables" car leur cycle naturel de reconstitution s'étend sur des millions d'années.

Au cours des décennies, la contribution respective de chaque énergie primaire fossile au mix énergétique mondial a évolué : les énergies reines du XIX^{ème} siècle (biomasse, charbon) ont peu à peu été détrônées par des énergies dites « modernes » (pétrole, gaz). Ce mécanisme a souvent été qualifié, à tort, de "substitution énergétique", une formulation qui suggère que le charbon aurait remplacé la biomasse, ainsi que le gaz et le pétrole ensuite. Or, nous sommes, en réalité, en présence d'un mécanisme d'addition énergétique où de « nouvelles » énergies primaires s'ajoutent aux énergies déjà établies, mais sans pour autant limiter leur usage au plan mondial. Fressoz (2012) relève, par exemple, que le pic de consommation du charbon au Royaume-Uni a été atteint en 1960, en pleine époque d'expansion du pétrole.

Figure 1: Evolution de la consommation mondiale d'énergie 1800-2000



Source: Fouquet et Pearson (2012)

S'il est souvent formulé, à tort, que le XIX^{ème} siècle est celui de l'avènement du charbon, il s'agit, en réalité, d'un siècle encore dominé par la combustion de la biomasse : celle-ci représentait environ 85% de l'énergie alors utilisée. C'est seulement à partir de 1840 que le

charbon voit sa part augmenter. Alors qu'il représentait 5% des énergies fossiles en 1840, il passe à 25% fin des années 1870 et atteint 50% à la fin du siècle (Smil, 2010). Dans les années 1920, le charbon représente jusqu'à 55% de la totalité de l'énergie produite, avant de décliner progressivement par la suite. Au milieu du XXème siècle, la part du charbon atteint 35% de l'ensemble des combustibles et 40% des énergies fossiles et reste donc la majeure partie du XXème siècle la première source d'énergie avant d'être supplanté par le pétrole en 1964. La baisse de la part du charbon dans le mix énergétique mondial s'est accompagnée d'une augmentation de sa production absolue, laquelle est montée de 700 Mt en 1900 à 3,6 Gt en 2000 (Smil, 2010). Après le choc pétrolier de 1973, la part du charbon dans le mix énergétique continue de baisser, mais à un rythme moins soutenu. Cela s'explique, d'une part, par l'augmentation de l'usage du charbon en Chine et en Inde et, d'autre part, par le constant recours à cette énergie de la part de certains pays industrialisés, au premier rang desquels les Etats-Unis. En 2013, le charbon représente 29% de la demande primaire d'énergie (AIE, 2015a).

Si le pétrole est une matière première familière à l'homme depuis des millénaires, son utilisation pour ses propriétés énergétiques remonte au XIXème siècle seulement. De 5% en 1915, le pétrole est passé à 33% de part du mix en 1965, avant de culminer à 40% en 1975 au moment du premier choc pétrolier. A l'issue des deux chocs, sa production continue d'augmenter mais selon une tendance moins marquée qu'auparavant. En 2013, le pétrole représentait 31,1% de la consommation d'énergie primaire mondiale. Le pétrole est omniprésent dans l'économie mondiale et trouve ses principaux débouchés dans le secteur des transports, de la chimie et, plus marginalement, dans celui de la production électrique.

Le développement du gaz naturel est plus récent. Jusqu'à ce que des innovations permettent d'assurer son transport et d'en limiter la dangerosité, le gaz était considéré comme un résidu et, à ce titre, pendant longtemps exclusivement brûlé à la torche. Le gaz est une énergie primaire dont la part croît dans le mix énergétique mondial, passant de 5% en 1930 à 25% en 1985. On observe, toutefois, que sa progression est relativement lente comparée à celle des autres énergies : si les productions de charbon et de pétrole ont grimpé de 5 à 25% en trente ans environ, il a fallu 50 ans (de 1940 à 1990) pour que le gaz suive cette trajectoire. En 2013, le gaz représentait 21,4% de la demande primaire d'énergie (AIE, 2015a). Les Etats-Unis sont longtemps restés le plus grand producteur au monde de gaz naturel jusqu'à ce que l'URSS les supplante en 1982. Grâce aux champs géants situés en Sibérie de l'ouest, la Russie est depuis le plus grand producteur et exportateur mondial de gaz naturel. Parallèlement, la découverte du procédé de liquéfaction du gaz, qui a sensiblement diminué les pertes liées à son extraction, a permis à de nouveaux Etats dont l'Indonésie, le Nigéria, et l'Australie de devenir à leur tour exportateurs de gaz. De plus, depuis le début des années 2000, dans un contexte où le prix des hydrocarbures atteignait des niveaux élevés, on assiste à l'exploitation à grande échelle du gaz de schiste hydraulique⁵. Un rapport de l'Administration pour l'information Energétique Américaine (EAI, 2013) indiquait que les réserves non prouvées de gaz de

⁵ Contrairement au gaz naturel, le gaz de schiste est piégé dans les porosités d'une roche rendue imperméable par l'argile qu'elle contient. Pour l'extraire, il est nécessaire de recourir aux techniques de forage dirigées et de fracturation hydraulique. Ces techniques font l'objet de controverses au regard de leurs impacts négatifs sur l'environnement.

schiste atteindraient 207 000 milliards de mètres cubes. Avec une production qui atteint 687 milliards de mètres cubes, les Etats-Unis sont, en 2013, le premier producteur de gaz de schiste (BP, 2014).

L'uranium est l'énergie primaire la plus récemment découverte. Les premiers programmes nucléaires de production d'électricité ont été lancés au milieu des années 1960 aux Etats-Unis et au début des années 1970 en Europe, et il connaît une utilisation croissante jusqu'en 2007. Dans les années 1990, l'atome représentait environ 5% du mix énergétique mondial. En 2001, le parc nucléaire assurait 17 % de la production d'électricité mondiale, soit son niveau le plus haut, pour retomber à 10,6 % en 2013 (AIE, 2015f). Après une forte croissance initiale, le nucléaire entre dans une phase de déclin : en effet, les catastrophes de Three Mile Island en 1979 et de Tchernobyl en 1986 ont réduit l'acceptabilité par les populations et conduit certains pays à s'engager dans la sortie du nucléaire. Toutefois, il est important de souligner que l'énergie nucléaire est une technologie incontournable pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ préconisés par la communauté scientifique et validés au niveau politique par un nombre de pays de plus en plus conséquent. En 2013, 434 réacteurs étaient opérationnels dans 30 pays différents, dont 58 en France. L'ensemble constitue une puissance totale de 370,5 GW, produisant environ 14 % de l'électricité mondiale.

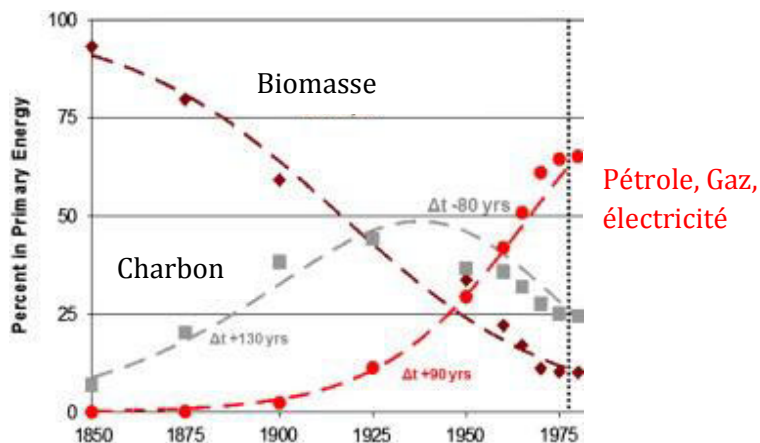
A l'origine, les systèmes de conversion reposaient exclusivement sur le processus de combustion du charbon et sur les techniques hydrauliques. Aujourd'hui, la production d'électricité s'appuie sur toute une gamme d'énergies primaires. En 2013, les énergies fossiles représentent 73,6% de la production d'électricité qui constituait 18% de la demande finale d'énergie (AIE, 2015a). Cette même année, les combustibles fossiles représentaient 67% de la production d'électricité, l'hydraulique 16%, le nucléaire 11%, et les autres énergies renouvelables 6%.

1.1.2 Des transitions à intervalles rapprochés

Des études réalisées sur l'histoire énergétique de ces deux derniers siècles ressortent deux constats saillants : d'une part, le délai nécessaire pour qu'une nouvelle énergie se place en première place du mix énergétique mondial (phénomène que nous nommons « substitution de l'énergie dominante ») ont progressivement raccourci, et, d'autre part, les transitions ont conduit à intégrer des énergies au coût plus élevé.

Les transitions énergétiques ont été le fruit d'un lent mécanisme de substitution des énergies dominantes, sur des périodes de l'ordre de plusieurs dizaines d'années, voire d'un siècle pour les plus lentes. En étudiant le laps de temps nécessaire à une énergie primaire pour passer de 1 à 50% de part de marché, Marchetti (1976) conclut qu'il faut une période de « 100 ans pour qu'une énergie dépasse 50% de part de marché et devienne ainsi dominante ». Grubler et Wilson (2011) relèvent pour leur part que cette durée est devenue de plus en plus réduite. Alors que la transition de la biomasse vers le charbon s'étend sur près de 130 ans, celle vers les « énergies modernes » (pétrole, gaz, électricité) ne dure que 80 ans.

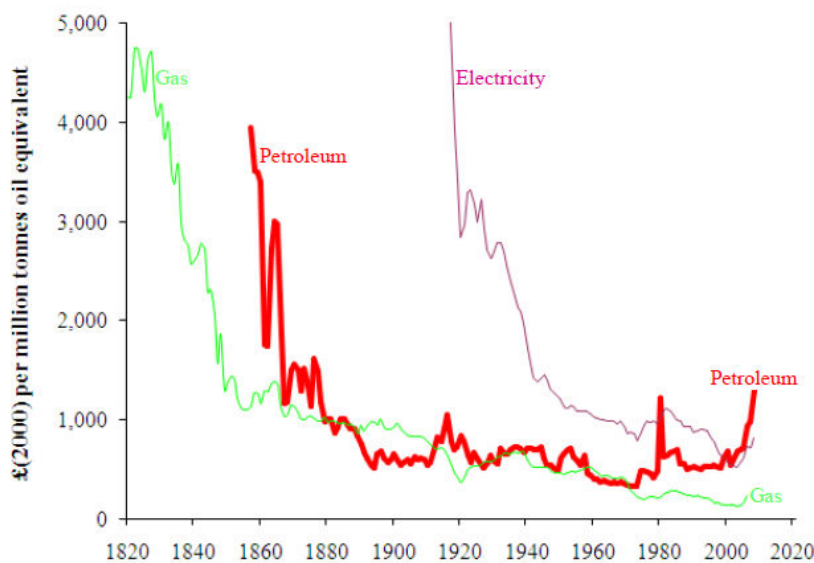
Figure 2: Illustration des transitions énergétiques de l'ère industrielle



Source: Wilson et Grubler (2011)

Dès lors, se pose la question du prix des nouvelles énergies primaires, afin de comprendre dans quelle mesure ce facteur permettrait d'expliquer le raccourcissement des durées de transitions.

Figure 3 : Prix des nouvelles sources d'énergie au Royaume-Uni sur la période 1820-2008



Source : Fouquet (2010)

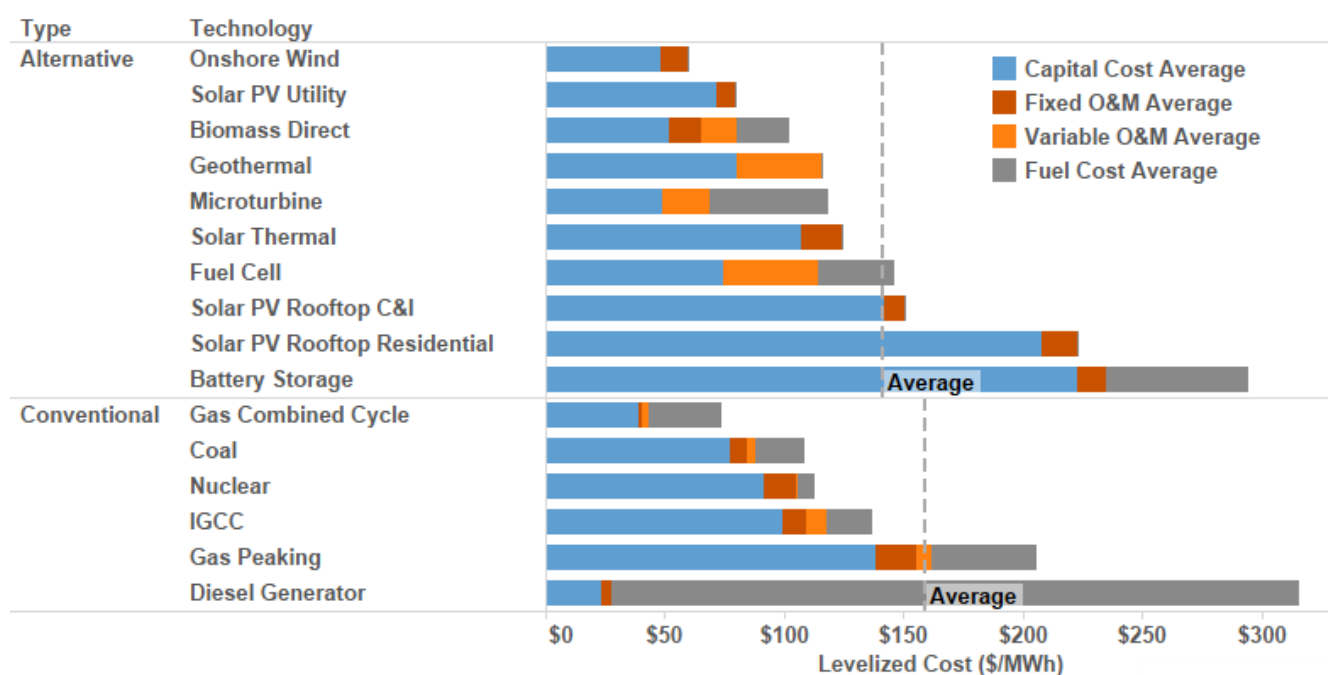
Cette figure montre, d'une part, que les prix de l'énergie ont tendance à structurellement décroître même si des facteurs tels que les guerres ou la tension des marchés peuvent, conjoncturellement, conduire à une hausse passagère. Elle met, d'autre part, en évidence un mécanisme relativement contre-intuitif : les nouvelles énergies se sont ajoutées au mix énergétique alors même qu'au moment de leur introduction, leur prix était plus élevé que celui des énergies établies.

La compréhension de la formation des coûts de production de l'électricité est, de ce fait, cruciale. D'abord parce que ce sont eux qui guident les producteurs, quant à la décision

d'investir dans telle ou telle technologie. Ensuite parce qu'ils vont déterminer l'ordre dans lequel les centrales sont appelées. Or, le coût de production de l'électricité différant selon chaque centrale, le producteur commencera systématiquement par faire appel à celles dont le coût est le plus faible avant de solliciter celles dont le coût est plus élevé. Le classement des différentes infrastructures de production en fonction de leurs coûts respectifs est appelé « ordre de mérite des centrales ».

La méthode de l'approche par le coût actualisé (LCOE) permet d'estimer les coûts moyens de production de l'électricité actualisés pendant toute la durée de vie des centrales électriques. Pour une technologie donnée, on distingue les coûts fixes (construction, démantèlement) des coûts d'exploitation (combustibles, opération et maintenance). Le coût actualisé de production est donc calculé à partir, d'une part, du coût du capital (dit CAPEX, soit Capital Expenditure), et d'autre part des prix des énergies primaires et des charges relatives aux opérations et à la maintenance (dit OPEX soit Operations Expenditure ou O&M).

Figure 4: Coûts de production actualisés de l'électricité (taux d'actualisation de 5%) aux Etats-Unis



Source : Lazard (2014)

Afin de définir ces coûts, différentes hypothèses⁶ ont été retenues. Elles concernent notamment les coûts d'investissement, les facteurs de charge, le coût des matières premières, les délais de construction et la durée de vie de la centrale considérée. Notons que les coûts d'investissement, qui varient considérablement d'une technologie à l'autre représente le paramètre le plus important de toute décision d'investissement.

Ces éléments mettent, par ailleurs, en évidence l'importance de l'écart entre les différents coûts de production, d'un facteur de l'ordre de 1 à 5 entre la production d'électricité à partir

⁶ Cf. [Annexe 1 : Hypothèses retenues pour le calcul du coût de l'électricité dans l'étude Lazard \(2014\).](#)

de nucléaire et celle générée à partir de solaire photovoltaïque installé sur les toits des bâtiments résidentiels. On notera, en outre, que l'éolien onshore est très proche de la parité réseau.

1.2 LA DYNAMIQUE DE LA DIFFUSION DES TECHNOLOGIES ENERGETIQUES

L'histoire de l'énergie souligne régulièrement l'influence des mécanismes de marché dans les transitions énergétiques. Michel Lepetit (2014) évoque ainsi la période du XI^{ème} au XIV^{ème} siècle, qu'il qualifie de «trois cents glorieuses », en insistant sur le rôle joué par la base énergétique constituée de dizaines de milliers de moulins à vent et à eau. Cette base énergétique a favorisé l'essor d'une proto-industrie dynamique (agroalimentaire, textile et sidérurgie) à forte valeur ajoutée, et généré des gains de productivité continus. Les technologies énergétiques ont également conduit à une forte accélération de la productivité agricole, et de la démographie. Un mouvement qui a initié un cercle vertueux d'innovations technologiques renforçant à leur tour le développement économique.

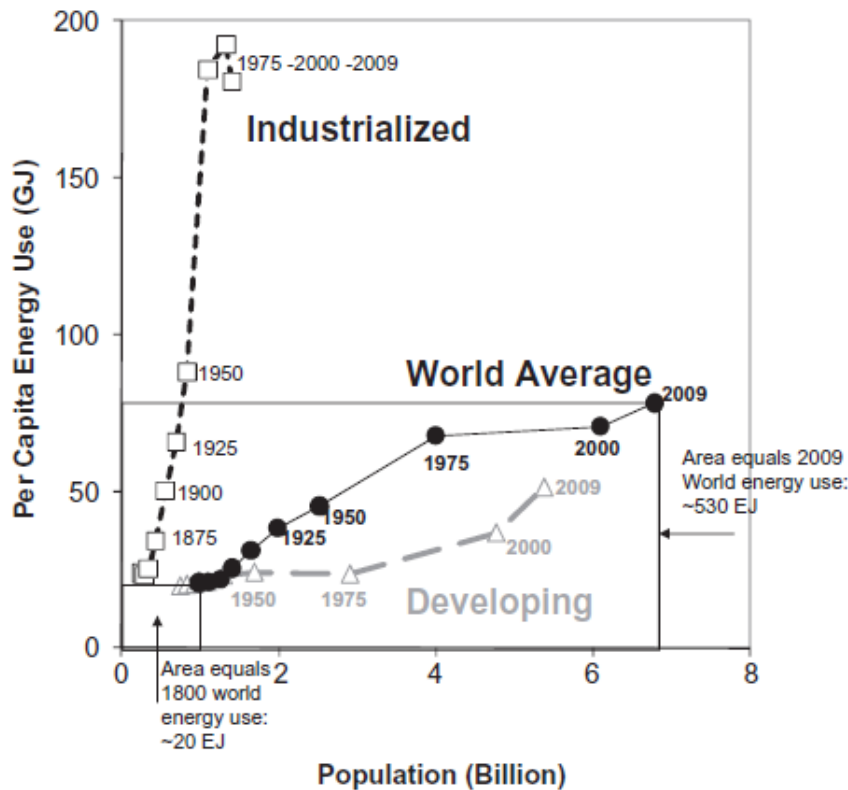
Pendant l'ère industrielle, la transformation des systèmes énergétiques a permis d'améliorer les systèmes de production, d'en augmenter les cadences, d'en développer de nouveaux et de multiplier les usages de l'énergie, si bien qu'une nouvelle classe d'entrepreneurs a émergé et bâti des fortunes grâce au développement de ces nouveaux systèmes (Ford, Rockefeller, Edison, ...).

Allen (2012) démontre qu'en Angleterre, le coût élevé des salaires a encouragé la mise en place d'un nouveau système énergétique. L'Angleterre était au XVIII^{ème} siècle le pays où les salaires étaient les plus hauts, en valeur absolue et rapportés au niveau de vie. Le coût du travail était particulièrement élevé par rapport au coût du capital, et donc déterminant dans le choix d'investissement pour tel ou tel système de conversion thermique. Si du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle, le coût du salaire rapporté à celui du capital était du même ordre à Strasbourg, Vienne, et en Angleterre du Sud, la situation a évolué à partir du XIX^{ème}. L'expansion du commerce extérieur anglais a contribué à induire un niveau de salaire très élevé comparé au prix de l'énergie, particulièrement bas. C'est donc ce niveau élevé des salaires qui est responsable, lorsque cela a été possible, de la substitution de l'énergie issue du travail de l'homme par une énergie mécanique, plus abordable. Cette analyse est corroborée par Fouquet (2011) qui note qu'entre 1820 et 1835, les prix de l'énergie augmentent, reflétant une augmentation du salaire réel, à cause de la déflation rapide, et un doublement de la puissance due au travail. La conclusion de Fouquet est similaire : ce mécanisme a favorisé la substitution du travail humain au profit des moteurs à vapeur, chaque fois que cela a été possible, dans le but de réduire les coûts de production

Si la substitution du travail par le capital a permis d'augmenter la création de valeur et, par là même, la consommation d'énergie primaire, ce mécanisme ne suffit pas, en soi, à expliquer l'ampleur du phénomène. Pour comprendre les mécanismes intrinsèques, il est intéressant de comparer l'évolution de la consommation énergétique des pays industrialisés à celle des pays

en développement, ainsi que l'a fait Grubler (2004), pour la période 1800-2000 qui met en évidence des disparités régionales significatives.

Figure 5 : Evolution de la consommation énergétique par habitant en fonction de l'augmentation de la population



Source : Grubler (2004)

Malgré une hausse plus limitée de la population, (multipliée par deux dans les pays industrialisés et par six dans les pays en développement), la consommation énergétique par habitant des pays industrialisés est passée de 20 GJ en 1800 à 190 GJ en 2000. Sur la même période, la consommation moyenne par habitant des pays en développement a plus modestement augmenté de 20 GJ à environ 50 GJ, malgré une nette accélération depuis les années 1975, à mesure du développement économique de la Chine et de l'Inde. Pour expliquer cet écart, Grubler et Wilson (2011) soulignent que les processus de conversion énergétique des pays en développement ont des performances médiocres. Dans ces régions, 20-50 GJ d'énergie primaire par habitant délivrent une quantité d'énergie finale de seulement 2 à 5 GJ. Grâce à un système énergétique performant, de nouvelles applications se sont développées dans les pays industrialisés entraînant une augmentation de la demande énergétique. Par exemple, l'alimentation en énergie des processus automatisés présents dans les usines ou l'alimentation des systèmes d'information et des serveurs requièrent une quantité d'énergie importante, ce qui permet d'expliquer les différences de consommation entre les pays industrialisés et ceux en voie de développement.

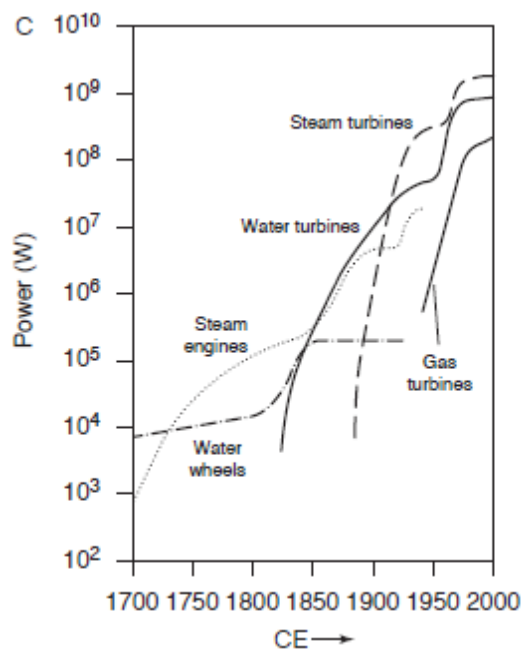
Durant l'ère industrielle, de nouveaux besoins (chauffage, éclairage, mobilité, appareils ménagers, industrie...) ont créé de nouveaux marchés responsables de l'augmentation de la

consommation d'énergie. Ces nouveaux marchés ont pu être alimentés grâce à l'addition successive des nouvelles énergies primaires et grâce des progrès aboutissant au développement et à l'amélioration de nouvelles techniques de conversion.

1.2.1 Un processus d'addition technologique

Le processus d'addition énergétique (nouvelles énergies primaires) constaté plus haut est combiné à un processus d'addition technologique (nouvelles techniques de conversion). Une nouvelle offre technologique s'est développée, permettant d'utiliser une gamme élargie d'énergies primaires, qui se sont successivement ajoutées dans le mix électrique mondial. Les performances des nouveaux systèmes de conversion ont, de surcroît, fait des progrès significatifs, tant au niveau de la puissance (cf Figure 6) que de l'efficacité (réduction de la déperdition) favorisant ainsi la croissance de la consommation énergétique.

Figure 6 : Evolution des puissances énergétiques depuis 1800



Source: Smil (2010)

Nous présenterons, dans un premier temps, les principales découvertes portant sur les technologies énergétiques réalisées depuis le début du XIXème siècle et l'évolution de leur performance en documentant le cas particulier de l'électricité. Dans un second temps, nous mettrons en évidence le rôle de la technologie pour diminuer le coût des services énergétiques.

Au cours du XIXème siècle, le moteur à vapeur a évolué de manière significative. On estime que sa puissance maximale était de 3 MW en 1900, contre seulement 100 kW un siècle plus tôt (Smil, 2010). Les machines à vapeur les plus performantes construites à la fin du XIXème

siècle enregistraient une efficacité énergétique de l'ordre de 20%. A titre de comparaison, l'efficacité énergétique des locomotives à vapeur à la même époque n'a jamais excédé 10%.

Le remplacement des moteurs à vapeur par les turbines à vapeur s'explique par les performances supérieures de ces dernières : un meilleur ratio « poids / puissance » 1,3 g/W contre 250-500 g/W pour les moteurs à vapeur, assorti d'une puissance supérieure. En 1884, la première turbine à vapeur, introduite par un brevet de Charles A. Parsons, s'est rapidement imposée comme étant le convertisseur le plus puissant et le plus efficace. En 1891, la plus grosse turbine à vapeur affichait une production de 100 kW et dès 1899 est construite la première unité d'1 MW. En quelques années seulement, l'efficacité énergétique est passée de moins de 2% en 1885, lors des premières expériences de Parsons, à 5% en 1890 pour la centrale de Newcastle. Fouquet (2011) estime que l'efficacité des processus de conversion a triplé entre 1850 et 1900. Avant la première guerre mondiale, l'ordre de grandeur de l'efficacité énergétique des turbines à vapeur était de 25%. La capacité maximale des turbines à vapeur aux Etats-Unis augmente rapidement de 1 MW en 1900 à plus de 200 MW au début des années 1930 pour culminer à 1 000 MW en 1967. Afin d'en augmenter l'efficacité énergétique, de nombreuses améliorations ont été apportées au procédé : la vapeur a été chauffée à plus haute température passant de 200°C au début du siècle à 600°C en 1960, et la pression augmentée de 1 Mpa à 20 Mpa au cours de la même période.

Parallèlement au développement des systèmes de conversion utilisant le charbon, les premiers moteurs à gasoil de Diesel et Maybach sont construits en Allemagne en 1883. La puissance du moteur a rapidement augmenté : de 500 W, lors des premières expérimentations, à 26 kW en 1900 ; elle est aujourd'hui comprise entre 50 et 375 kW. Les moteurs à combustion interne, développés eux aussi par Diesel, offrent pour leur part une meilleure efficacité énergétique, de l'ordre de 26% pour une puissance de 13,5 kW. Les plus gros moteurs à diesel sont aujourd'hui les seules machines à combustion interne dont l'efficacité peut atteindre 50%.

L'électricité est une énergie secondaire qui peut être produite à partir de ressources variées, renouvelables ou fossiles. L'électricité renouvelable s'obtient en convertissant les flux d'énergies naturelles telles que l'eau, le vent, la chaleur de la terre, le rayonnement solaire ou les vagues des océans. La production d'électricité par l'énergie primaire fossile suit le processus suivant. La combustion de l'énergie primaire fossile (charbon, gaz, pétrole, biomasse) chauffe l'eau pour la transformer en vapeur, augmentant ainsi la pression et la température. Le flux de vapeur à haute pression est ensuite dirigé dans une turbine qui entraîne une hélice en rotation. Un alternateur permet enfin de convertir le mouvement de rotation en courant électrique. Dans le cas des centrales nucléaires, la vapeur d'eau est obtenue grâce à la chaleur générée par la fission nucléaire (laquelle n'est pas une réaction de combustion). Au cours de ce processus, l'énergie chimique a successivement été convertie en énergie thermique, puis en énergie cinétique et enfin en énergie électrique. A chaque étape de la chaîne on observe des pertes de conversion, la plupart du temps sous forme de chaleur.

Dans les centrales thermiques, le rendement énergétique est compris entre 35 % et 55 % de l'énergie initiale contenue dans le combustible⁷.

Certains phénomènes électriques, comme l'électricité statique, sont connus depuis des siècles et les premières expérimentations qui ont posé les fondements de la science moderne de l'électricité remontent au début XIX^{ème} siècle. En 1800, Alessandro Volta construit la première pile, en 1819 Hans Christian Orsted découvre l'effet magnétique des courants électriques, André Marie Ampère énonce le concept d'un circuit complet et quantifie les effets magnétiques des courants électriques, et en 1831 Michael Faraday découvre l'induction du courant électrique dans un champ magnétique mouvant. C'est cette dernière découverte, appliquée à la conversion à grande échelle de l'énergie mécanique en électricité, qui a signifié la fin des lourdes et volumineuses batteries, lesquelles ne dispensaient qu'une quantité limitée d'électricité, utilisée auparavant. Devenue économiquement viable à partir des années 1880, cette nouvelle forme d'énergie a conduit au développement des premières centrales de production d'électricité capables de desservir plusieurs quartiers urbains.

L'introduction de l'électricité à usage commercial est née de l'invention de la première ampoule, brevetée en 1879 par Thomas Edison. Les premiers systèmes commerciaux, soit le viaduc de Holborn à Londres (1881) et Pearl Street Station à New York (1882), se sont appuyés sur la combustion de charbon et le mouvement alternatif des moteurs à vapeur pour faire tourner leurs dynamos électriques et produire de l'électricité sous forme d'énergie secondaire. Pearl Street Station s'appuyait sur quatre réacteurs Babcox et Wilcox d'une puissance de 180 kW chacun et sur six moteurs à vapeur Porter Allen d'une puissance de 94 kW (Smil 2010), permettant d'alimenter 5 000 ampoules en électricité. La centrale de Pearl Street convertissait moins de 2,5% de l'énergie du charbon en courant électrique (Parsons, 1936). En 1907, Parsons installe une turbine de 5 MW, avec un taux d'efficacité d'environ 22% (Parsons, 1936). Selon des statistiques réalisées aux Etats-Unis, les taux moyens d'efficacité de conversion du charbon en électricité sont montés de moins de 4% en 1900 à presque 14% en 1925, pour atteindre 24% en 1950 et un peu plus de 30% en 1960 (Schurr & Netschert, 1960). En 1975, l'efficacité des meilleures centrales franchit pour la première fois la barre des 40%.

La production d'électricité primaire, c'est-à-dire de courant électrique sans recours à la combustion d'hydrocarbure, date elle aussi de la fin du XIX^{ème} siècle. Aux Etats-Unis, le premier système hydraulique a été opérationnel en 1882. La première centrale hydroélectrique d'Edison affichait une puissance de 25MW et fonctionnait grâce au courant de la Fox River d'Appleton qui alimentait deux dynamos par le biais d'une roue en bois. Les premières turbines à eau remontent au milieu du XIX^{ème} siècle et la production d'hydroélectricité a pu se développer grâce à deux nouveaux concepts de turbines. D'abord, l'introduction de la turbine à réaction au cours des années 1820 et 1830 par Benoit Fourneyron (Smith, 1980), améliorée ensuite par différents inventeurs dont Samuel B. Howd (brevet déposé en 1838) et

⁷ Notons que la chaleur obtenue peut permettre d'alimenter un réseau de chauffage : on parle alors de cogénération puisque l'on produit à la fois de la chaleur et de l'électricité. Ce mécanisme permet ainsi d'augmenter le rendement énergétique global de la centrale.

James B. Francis (Hunter, 1979), puis de la turbine à impulsion actionnée par des jets déchargés dans des cuves périphériques, un procédé essentiellement adapté aux chutes d'eau, qui a été inventée au cours des années 1880 par Lester Allen Pelton. En 1913, Viktor Kaplan dépose le brevet de la turbine à réaction dont les propulseurs réglables à flux vertical sont devenus la norme de choix pour les eaux à faible débit. A la fin du XIX^{ème} siècle, un nombre croissant de barrages est construit dans les Alpes, mais le plus grand projet d'hydroélectricité reste celui la centrale des Chutes du Niagara, achevée en 1895 et étendue en 1904. Sa capacité installée de 78,2 MW (dans 21 turbines de 3,7 MW) contribua à hauteur de 20% à l'augmentation de la production d'électricité totale aux Etats-Unis (MacLaren, 1943).

L'introduction des turbines à gaz dans la production de l'électricité est étroitement liée au développement de l'aéronautique, ainsi qu'en témoigne le premier brevet de turbine à gaz déposé dans ce domaine par Frank Whittle en 1936. La poussée des premiers appareils était alors de 22,25 kilo Newton (KN); elle est actuellement de l'ordre de 512 KN. Deux compagnies, Airbus et Boeing, ont survécu à la compétition technologique internationale et s'appuient sur trois fournisseurs pour produire les moteurs : les américains General Electric et Pratt and Whitney's et l'anglais Rolls Royce. En 1976, la turbine la plus puissante atteignait 100 MW et offrait une efficacité de 32%. Un peu plus de vingt ans plus tard, en 2008, la plus grosse turbine développée par Siemens affichait une puissance de 340 MW, et aujourd'hui, les turbines à gaz les plus performantes, utilisées dans l'aviation et la production d'électricité, offrent un taux d'efficacité d'environ 40%.

L'électricité nucléaire est passée, en vingt-trois ans à peine, du stade de concept scientifique à celui de centrale commerciale. La découverte de Neutron en février 1932 par Chadwick a ouvert la voie à la fission d'isotopes à partir d'éléments naturels très lourds afin d'en libérer l'énergie. Six mois environ après l'annonce de Chadwick, Leo Szilard a énoncé, puis rapidement breveté, le concept de réaction en chaîne. Si la première démonstration d'un réacteur nucléaire d'une puissance de 0,5 W s'est tenue à l'Université de Chicago en 1942, c'est dans le domaine militaire que le nucléaire a connu ses premières applications. Au sortir de la guerre, ces applications se sont progressivement étendues au domaine civil. En 1954, à sa mise en service, le réacteur d'Obninsk fournissait de l'électricité avec une puissance de 5 MW et en 1990, un réacteur moyen proposait une capacité de 900 MW. Aujourd'hui, la puissance moyenne est de l'ordre de 1000 MW et 1600 MW pour certains réacteurs de nouvelle génération (réacteurs EPR).

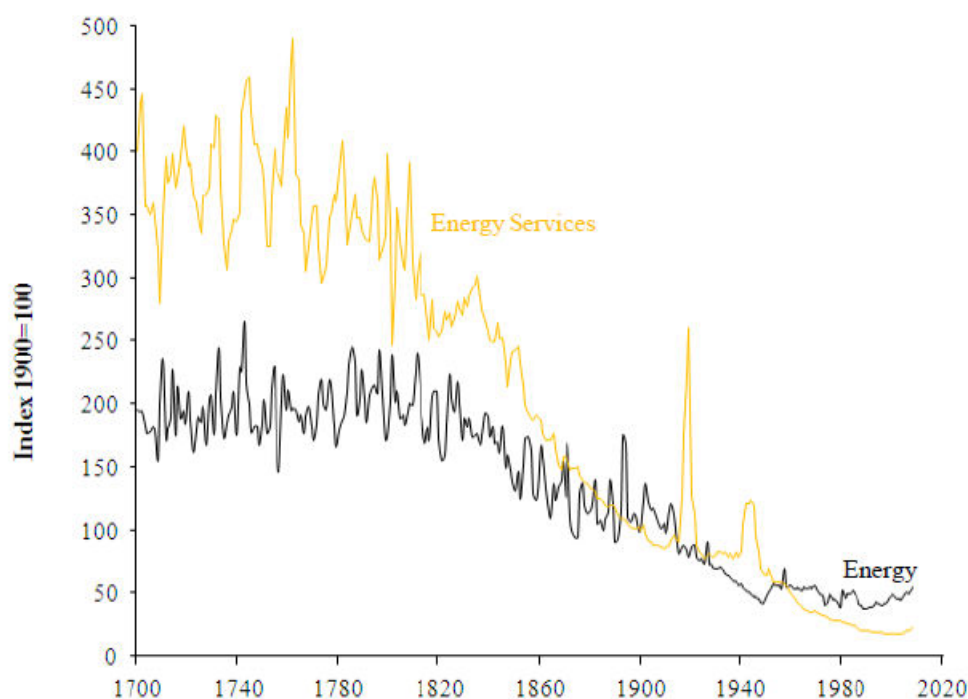
D'autres innovations relatives à la génération thermique d'électricité ont permis de porter l'efficacité à 60% en récupérant la chaleur perdue (technologie à « cycles combinés »). En revanche, l'efficacité maximale des centrales de production d'électricité à partir de charbon utilisant la configuration classique (c'est à dire articulant une chaudière et un turbogénérateur à vapeur) dépasse difficilement 40%. Au cours des deux siècles précédents, a ainsi été observé un gain d'efficacité de grande magnitude, en passant de 6% pour les moteurs à vapeur à environ 60% pour les turbines à gaz à cycle combiné.

L'observation du progrès technique permet de comprendre les raisons pour lesquelles de nouvelles énergies primaires, bien que d'un coût supérieur aux sources déjà établies, se sont

régulièrement ajoutées au mix électrique mondial. Nordhaus (1997) souligne le biais lié à une observation exclusive du prix des énergies primaires, sans considération des progrès accomplis dans leur transformation. Il illustre ce biais en faisant observer que le prix de l'énergie primaire ne permet pas d'expliquer la baisse du coût de l'éclairage sur les deux cent dernières années, ni, par conséquent, de mesurer les gains associés pour le consommateur.

En s'appuyant sur ces travaux, Fouquet (2011) révèle que la technologie a contribué, à partir des années 1820, à diminuer le coût des services énergétiques à un rythme beaucoup plus soutenu que celui de l'énergie (figure 7) grâce à la généralisation de la machine à vapeur qui fait des progrès considérables en termes de puissance et d'efficacité. A partir du XX^{ème} siècle, l'introduction de l'électricité a été accompagnée d'une décroissance du prix des services énergétiques (à l'exception des années marquées par le contexte de guerre mondiale où les coûts de transports maritimes eurent un fort impact sur le coût des services énergétiques), sans commune mesure avec l'évolution des énergies primaires⁸.

Figure 7 : Prix moyen de l'énergie et des services énergétiques en Angleterre sur la période 1700 - 2008



Source : Fouquet (2011)

Comme l'illustre la figure 8, les progrès techniques ont fait baisser le prix des services énergétiques sur l'ensemble des secteurs économiques, décroissance nettement plus marquée que celle du prix de l'énergie.

⁸ [L'Annexe 2 : Le Cas de l'éclairage en Angleterre](#) présente, pour la période 1300-2000, l'évolution du coût de l'énergie utilisée pour s'éclairer (suif, puis gaz, puis électricité) par rapport à celui de l'éclairage et montre que le coût de l'éclairage est désormais inférieur à celui des énergies nécessaires pour ce service.

Figure 8: Multiple de décroissance des prix de l'énergie et des services énergétiques pour la période 1800-2000

	Prix de l'énergie	Prix du service
Chauffage	0,7	7,4
Electricité	14,1	26,0
Transport (frêt)	2,9	10,0
Transport (passagers)	2,9	9,1
Eclairage	5,7	4380
Moyenne	4,2	19

Source : Fouquet (2011)

1.2.2 La diversification des besoins énergétiques

La demande a également joué un rôle déterminant dans l'augmentation de la consommation énergétique et dans le processus d'addition énergétique. L'histoire du charbon, du pétrole et de l'électricité, est révélatrice des mécanismes par lesquels, sous l'impulsion du développement des filières industrielles, de nouveaux besoins énergétiques ont émergé, sans pour autant se substituer aux anciens. Le rôle joué par les nouveaux usages et en particulier celui du développement de l'électricité, permettent d'expliquer en partie les raisons pour lesquelles une large variété d'énergies primaires, y compris celles dont le coût est significativement supérieur, est mobilisée pour sa production.

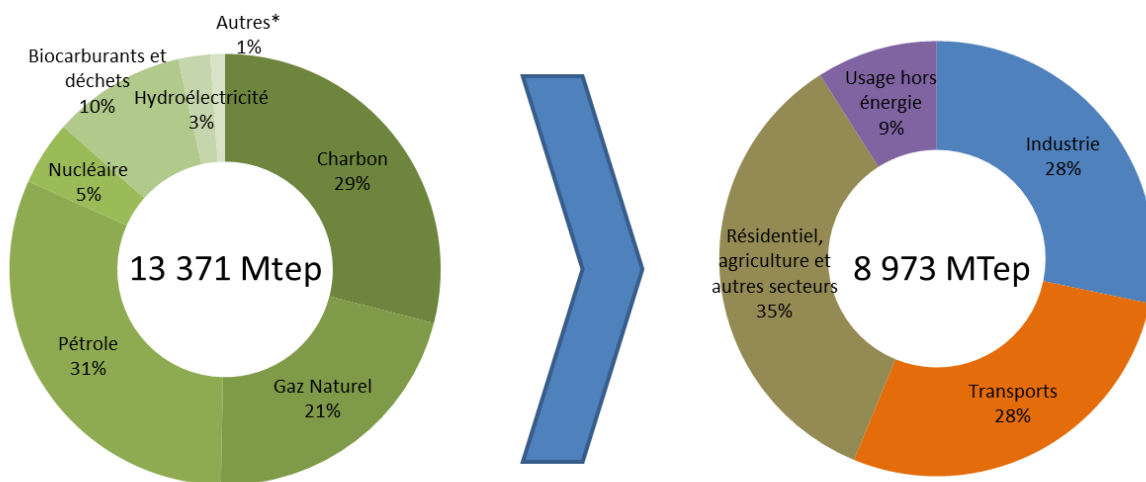
L'usage du charbon a permis de dépasser les limites imposées par la puissance humaine ou animale et initié le processus d'industrialisation ; il a conduit à l'émergence des industries métallurgiques, dans le même temps que la demande d'acier favorisait son essor. On a ainsi assisté au développement de filières métallurgiques dont les premiers débouchés ont été les transports (chemins de fer) et la construction de machines manufacturées destinées à l'industrie textile, des unités industrielles à l'origine du réveil économique des régions riches en charbon. Le développement du charbon n'est donc pas un phénomène isolé, mais s'inscrit dans le déploiement de tout un écosystème industriel. L'Angleterre, premier producteur mondial de charbon pendant plus de 150 ans, est devenu le pays pionnier de la révolution industrielle à travers la création de filières prospères (transport, industrie, textile, ...) et s'est ainsi propulsé au premier rang des puissances mondiales.

De même, après la deuxième guerre mondiale, la demande de pétrole s'est accrue en raison de la reconstruction, du développement de l'automobile et de celui de l'aviation civile. La construction d'infrastructures comme les pipelines et l'utilisation de super tankers pour le transport ont favorisé l'exportation de pétrole dans les régions qui ne disposaient pas de champs domestiques à exploiter. Le pétrole se caractérise par son intégration au cœur d'un écosystème varié et par ses usages multiples. Le secteur des transports et les compagnies de construction de navires, d'avions et d'automobiles s'appuient sur des moteurs à combustion, utilisant l'essence pour fonctionner, le secteur de la chimie se sert des dérivés du pétrole pour produire du plastique ou des engrais. Il est également utilisé comme combustible pour le

chauffage et pour produire de l'électricité. Ainsi, dès son introduction au début du XXème siècle, le pétrole ne remplace pas l'usage du charbon : il permet de créer de nouveaux marchés énergétiques. On peut également citer le cas du gaz, à l'origine utilisé pour l'éclairage, et qui aujourd'hui répond à de nouveaux besoins : usages industriels, intrant dans la production de chaleur et d'électricité, ...

La figure 9 représente la répartition de la production mondiale d'énergie primaire et la variété des usages possibles de l'énergie. Notons que ce graphique ne présente pas précisément les chiffres de la production électrique, dont la production mondiale a atteint 2 486 Mtep en 2012 (AIE, 2014b). La différence entre la consommation finale et la production totale s'explique par les pertes d'énergies au cours des processus de transformation ainsi que par l'autoconsommation des centrales en mesure de produire l'énergie finale.

Figure 9 : Production et consommation mondiale d'énergie en 2012



*incl géothermie, solaire, éolien ...

Source : AIE (2014b)

Le développement des nouveaux besoins a donc encouragé le processus d'addition énergétique et la croissance de la demande. Les travaux de Grubler (2012) qui permettent de comprendre le rôle des nouveaux usages, soulignent que, plus que l'offre, c'est la demande d'énergie finale qui est à l'origine de l'augmentation de la production énergétique.

En s'appuyant sur les données relatives à l'évolution des puissances depuis 1850 au niveau de l'offre et des usages, Grubler et Wilson (2011) montrent ainsi que depuis le début du XXème siècle les applications « bout de chaîne » (automobiles, applications électriques...) représentent la plus grande partie (90%) des puissances totales installées.

Figure 10 : Evolution des capacités énergétiques installées aux Etats-Unis en GW (1850-2000)

Application	Catégorie de conversion d'énergie	1850	1900	1950	2000
Consommation stationnaire	Thermique (fours/chaudières)	300	900	1,900	2,700
	Mécaniques	1	10	70	300
	Electriques (variateurs, appareils)	0	20	200	2,200
Consommation mobile	Animaux/bateaux/train/avions	5	30	120	260
	Automobiles	0	0	3,300	25,000
Approvisionnements énergétique fixe	Chaudières (centrales)	0	10	260	2,600
	Mécaniques (principaux motionnaires)	<1	3	70	800
Total		300	1,000	6,000	34,000

Source : Grubler et Wilson (2011)

Lors de l'introduction de la vapeur aux Etats-Unis dans les années 1850, les technologies énergétiques dominantes étaient de simples dispositifs de conversion tels que les fours, les fourneaux et les chaudières, qui convertissaient l'énergie chimique du charbon en chaleur. Dès 1900, la conversion thermique « bout de chaîne » assurée par les chaudières et les fourneaux représentait 90% des 1000 GW de la puissance totale installée de conversion aux Etats-Unis. Un siècle plus tard, cette puissance atteint 34 000 GW, c'est-à-dire plus de 10 fois le niveau de 1850. Cette expansion spectaculaire est, en grande partie, liée à l'accès de masse à la mobilité individuelle et à l'électricité.

Grubler conclut que c'est bien la demande pour les services énergétiques, comme l'éclairage, le chauffage, la mobilité et les technologies « bout de chaîne » (tels que les moteurs à essence ou les applications électriques), qui ont induit le développement d'une offre technologique destinée à y répondre. Il rappelle ainsi que ce n'est qu'après avoir inventé l'ampoule électrique (innovation « bout de chaîne ») qu'Edison a développé les inventions relatives à l'offre (génération et transmission).

L'électricité a eu, tout au long du XXème siècle, un impact structurant sur le mode de vie de milliards d'individus. Parce qu'il serait impossible de décrire l'histoire de l'ensemble des applications de l'électricité tant elles sont variées, nous allons nous concentrer sur l'évolution des taux d'équipement des appareils électroménagers⁹ et mettre en évidence les modifications structurelles que leur développement a générées.

⁹ Les appareils électro-ménagers ont été introduits aux Etats-Unis autour des années 1910 : les machines à laver ont été commercialisées dès 1907, les aspirateurs à partir de 1908 et les réfrigérateurs en 1912.

Dans sa tribune d'octobre 2015¹⁰, Ana Swanson, journaliste au Washington Post, notait que « le réfrigérateur fut sans doute la technologie la plus radicale qui a émergé au cours du XXème siècle ». Alors que cet équipement était pratiquement absent des foyers américains dans les années 1920, les deux tiers des Américains en possédait un 20 ans plus tard. La présence d'un réfrigérateur permettant de garder la nourriture pendant plusieurs jours (jusqu'alors conservée par saumurage ou fumage) a bouleversé non seulement les modes de consommation des foyers américains mais aussi plus largement l'organisation de l'ensemble de la société.

De nouvelles filières (agroalimentaires, produits de grande consommation, biens d'équipement) ont vu le jour et le temps consacré aux tâches ménagères a significativement baissé, tombant de 60 heures par semaine en 1900 à 11 heures par semaine en 2011. La journaliste souligne que c'est grâce à ces nouveaux équipements électriques que les Américains ont pu consacrer plus de temps à leurs loisirs et à leur emploi, « particulièrement les femmes qui étaient en charge des tâches ménagères et qui ont pu, grâce à l'arrivée de ces techniques, prendre un emploi salarié et devenir financièrement indépendantes ». Thomas Edison avait d'ailleurs anticipé ces transformations sociétales en prédisant en 1912 dans le magazine « Good Housekeeping » que les femmes passeraient du statut de « travailleur domestique à ingénieur domestique grâce aux servantes électriques à leur service ».

Si le développement des nouveaux usages et les modifications structurelles de l'organisation des sociétés permettent aisément de comprendre pourquoi l'électricité s'est peu à peu imposée, au point de devenir omniprésente, la question de la multiplicité des énergies primaires utilisée en intrant nécessite d'être clarifiée. Alors que, d'une part, du point de vue du consommateur final, l'utilisation de telle ou telle énergie primaire n'apporte pas de valeur supplémentaire et que, d'autre part, les coûts de production à partir des différentes sources d'énergie sont significativement différents, comment expliquer que les producteurs ne se concentrent pas sur l'installation de centrales au coût de production le plus faible ? La réponse à cette question découle de la compréhension du fonctionnement du marché de l'électricité et en particulier du rôle de la demande.

Dans la mesure où l'électricité est un bien dont le stockage est actuellement limité, la quantité d'électricité injectée dans le réseau doit être égale, à tout instant, à celle de l'énergie consommée : la production d'électricité est donc directement corrélée à la demande. Or, cette demande n'est ni homogène, ni régulière et varie selon les régions, les saisons et les moments de la journée. C'est en fonction du niveau de besoin énergétique que les producteurs « appellent » les centrales, classées par ordre de mérite, sur la base du coût de production de l'électricité. Mais ces besoins électriques sont variables : ils peuvent se limiter à la « base », c'est-à-dire la quantité d'électricité en-dessous de laquelle la consommation ne descend jamais, et grimper jusqu'à "la pointe" pendant les pics journaliers ou saisonniers.

Ainsi, les centrales nucléaires ou hydrauliques qui ont nécessité un investissement conséquent, mais qui offrent un coût de production particulièrement faible, servent à assurer

¹⁰ <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2015/10/14/the-most-disruptive-technology-of-the-last-century-is-in-your-house/>

les besoins de « base ». En revanche, les centrales à gaz au coût de production plus élevé satisfont, en général, les besoins de pointe. En cas de super-pointe, des systèmes d'appoint comme les turbines à combustion (au fioul ou au gaz), dont la puissance est plus faible, ou les barrages hydrauliques, sont utilisés. De par leur intermittence, les énergies de « flux » comme les éoliennes et l'énergie solaire ne peuvent pas contribuer à l'alimentation du réseau en continu. C'est donc en disposant d'un mix électrique diversifié que le producteur pourra répondre aux besoins de base et de pointe au meilleur coût. En outre, ce mécanisme met en évidence la complémentarité des énergies pour répondre à la demande fluctuante des besoins énergétiques.

Les mécanismes économiques éclairent significativement les faits marquants de l'évolution du système énergétique de ces deux derniers siècles, à savoir l'augmentation de la consommation énergétique et l'addition de nouvelles énergies primaires et secondaires.

L'analyse de la période qui s'étend de 1800 à nos jours met en évidence la coévolution entre l'offre énergétique et la demande en nouveaux services énergétiques. L'évolution de l'offre se caractérise par l'addition de nouvelles énergies au mix énergétique et par le développement de systèmes de conversion dont les performances en termes de puissance et d'efficacité se sont constamment améliorées. L'évolution de la demande a été induite par les nouveaux besoins liés à l'émergence, au XVIII^{ème} siècle, des filières industrielles, et n'a cessé d'augmenter tout au long du XX^{ème} siècle, parallèlement à l'essor économique. La technologie a joué un rôle important tant au niveau de la demande que de l'offre puisqu'elle a permis de multiplier les services énergétiques (mobilité individuelle, applications électriques...), d'en diminuer les coûts et de mettre à disposition toute une variété de systèmes de conversion.

Toutefois, c'est bien la demande en service énergétique qui est à l'origine de la transformation de l'offre et des transitions énergétiques. Selon Grubler, sans évolution de la demande (mesurée par les puissances « aval », soit 90% des puissances totales installées), il n'y aurait pas eu de modifications drastiques de l'offre (les puissances « amont » installées, qui ne représentent donc que 10% des puissances totales installées). Les économies d'échelle et la baisse du coût des services énergétiques sont une conséquence directe de l'augmentation des besoins énergétiques. C'est cette même augmentation des besoins qui est à l'origine de la croissance de la consommation énergétique et cela malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de conversion. Jevons (1865) se demandait pourquoi l'efficacité accrue des centrales n'avait pas conduit à une diminution de la consommation de charbon. Ce mécanisme (« effet rebond ») s'explique par le fait que la diminution de la quantité d'énergie nécessaire en intrant pour générer la même quantité d'énergie finale est compensée par la croissance de la consommation d'énergie finale, nécessitant du même coup l'augmentation de l'énergie en intrant pour la générer. Haas et al. (2008) soulignent que la hausse de la demande de services énergétiques dépasse les gains d'efficacité, d'où l'augmentation de la consommation observée.

C'est donc l'augmentation de la valeur offerte par chacun des couples énergies / système de conversion, traduite par leur capacité à répondre aux nouveaux besoins énergétiques, qui permet de comprendre la substitution des énergies dominantes et leur durée de plus en plus

brève. Le fait que les énergies modernes se soient substituées au charbon dans un délai plus court que celui nécessaire au charbon pour se substituer à la biomasse, s'explique, en effet, par la valeur supplémentaire apportée par ces énergies pour le consommateur. Cette valeur s'est traduite par une multiplication des usages et par une baisse du coût du service énergétique.

Les éléments développés ci-dessus à l'échelle globale du système énergétique sont valables au niveau du système électrique. Ils expliquent les raisons pour lesquelles, d'une part, l'électricité est devenue omniprésente en dépit de son importante perte énergétique et, d'autre part, pourquoi elle est générée par une variété d'énergies aux coûts hétérogènes.

L'électricité est une énergie secondaire caractérisée par sa flexibilité. Cette flexibilité lui permet d'apporter une valeur supplémentaire au consommateur par rapport aux autres énergies disponibles et de compenser les pertes énergétiques induites par son transport et sa conversion. Elle est liée à la nature même du système inventé par Edison, toujours en usage plus d'un siècle plus tard, qui s'appuie sur la production, la transmission et la conversion d'électricité en énergie, et qui a pour principal avantage de déconnecter le lieu de production de l'électricité de son lieu de consommation. Ainsi les consommateurs ne payent que l'énergie effectivement consommée et n'ont pas à investir dans des dispositifs de stockage des énergies primaires ou dans des capacités de conversion. En outre, suite à la diffusion rapide et massive du moteur à induction électrique breveté en 1888 par Nikola Tesla, cette flexibilité a permis de développer toute une variété d'applications électriques. En quelques décennies, les moteurs électriques sont devenus les convertisseurs de référence pour la plupart des industries et des appareils domestiques. De plus, l'électricité est produite à partir de centrales à la puissance et l'efficacité supérieures à celles dont disposent les autres technologies disponibles. Enfin, les prix des services énergétiques utilisant l'électricité ont diminué dans des proportions supérieures au coût de production de l'électricité.

Par ailleurs, l'évolution des besoins énergétiques a justifié l'addition successive de nouvelles énergies primaires au mix électrique. Dans la mesure où le niveau de production d'électricité est dicté par la demande et que cette demande est variable, une variété d'énergies primaires est nécessaire pour répondre aux fluctuations des besoins (base, semi base, pointe, super pointe) à moindre coût. C'est donc en fonction du niveau des besoins énergétiques que les producteurs « appellent » les centrales classées par ordre de mérite, sur la base du coût de production de l'électricité.

1.3 LA PLACE DES AUTORITES PUBLIQUES DANS LES TRANSFORMATIONS ENERGETIQUES

En France, les autorités publiques sont intervenues dès le Moyen-Age sur la question énergétique, à travers les banalités, des installations techniques (telles que le moulin ou le pressoir) qui permettaient de fournir une quantité d'énergie très supérieure à celles fournies par l'homme ou l'animal. Elles étaient la propriété du seigneur, lequel était dans l'obligation de les entretenir et de les mettre à disposition de tout habitant de la seigneurie. En contrepartie, ces derniers étaient contraints d'utiliser exclusivement ces installations et de payer pour leur utilisation. On peut assimiler ce système de banalités à un monopole du pouvoir en place sur les ressources énergétiques. Alors que certains historiens voient cet impôt comme une forme d'abus, pour d'autres observateurs, la contrepartie financière doit être comprise comme une sécurité pour assurer la rentabilité d'investissements très lourds¹¹.

Les Etats ont, de tous temps, pris des décisions qui ont affecté indirectement la question de l'énergie. Par exemple, l'abolition de l'esclavage et de la traite des noirs a signifié la fin d'une main d'œuvre gratuite et s'est fait jour la nécessité de mobiliser des ressources pour payer ce travail auparavant gratuit. Ce type de décisions a contribué, lorsque cela était possible, à la substitution du travail par le capital ainsi que l'ont démontré les travaux d'Allen (2012) sur le Royaume Uni¹². On peut également citer la construction d'infrastructures de services publics comme les chemins de fers, les canaux, les routes, les lignes de tramway et les services d'éclairages publics qui ont conduit à une demande croissante d'acier, de voitures, de bateaux, d'équipements électriques (ampoules, tramway, ...) et donc d'énergies primaires et secondaires pour les faire fonctionner¹³. De plus, des mesures comme l'instauration des brevets pour sécuriser la propriété intellectuelle ont participé au développement des technologies énergétiques¹⁴.

Si ces mesures ont eu un impact sur le développement des énergies, nous nous concentrerons sur les cas où les pouvoirs publics ont agi de façon directe sur les questions énergétiques. Il ressort de l'observation de l'histoire énergétique, deux domaines principaux où la question de l'énergie a engendré une intervention directe des pouvoirs publics. D'abord, le domaine de la sécurité énergétique : dans un contexte d'augmentation de la demande en énergie, les pouvoirs publics ont régulièrement veillé à assurer un certain niveau d'indépendance énergétique. Par ailleurs, le secteur militaire est doublement lié à la question de la sécurité énergétique, d'une part, parce qu'il requiert une quantité élevée d'énergie pour ses campagnes,

¹¹ On notera que l'usage des moulins devait faire l'objet d'une contrepartie financière au seigneur car l'eau utilisée pour les actionner était considérée comme étant la propriété du seigneur. En revanche, les moulins à vent pouvaient être librement installés car le droit en vigueur à l'époque ne permettait à quiconque de se prévaloir de la « propriété » du vent.

¹² Une présentation des travaux d'Allen est disponible dans le Chapitre I, section [1.2 La dynamique de la diffusion des technologies énergétiques](#).

¹³ Cf. Chapitre I, section [1.2.2 La diversification des besoins énergétiques](#).

¹⁴ Cf. Chapitre I, section [1.2.1 Un Processus d'addition technologique](#) met en évidence que les systèmes de conversion ont régulièrement fait l'objet d'un dépôt de brevet par leur inventeur.

et, d'autre part, parce que des opérations militaires ont régulièrement été menées afin de sécuriser les approvisionnements. Le deuxième principal domaine d'intervention des pouvoirs publics concerne la régulation la concurrence, qui vise à diminuer le coût de l'énergie pour les consommateurs, ce qui va nous amener à examiner la théorie des monopoles naturels et des marchés contestables.

1.3.1 La sécurité énergétique

Les pouvoirs publics ont régulièrement joué un rôle dans le développement des nouvelles énergies afin de veiller à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements en énergie primaire de la nation. En particulier, les situations de crises ou de guerre ont incité les décideurs politiques à agir sur ces questions. Ainsi, c'est dans un contexte d'après-guerre et pour assurer son indépendance énergétique que la France a initié, sous l'impulsion du Général de Gaulle, son engagement dans le nucléaire. En outre, le rôle des opérations militaires dans la question énergétique doit faire l'objet d'une attention toute particulière. D'une part, parce que les conflits armés ont mobilisé une quantité de plus en plus élevée d'énergie et, réciproquement parce que certains d'entre eux ont été menés pour assurer la sécurité des approvisionnements en énergie.

La croissance soutenue de l'industrie du pétrole au début du XXème siècle s'explique par le fait que les entrepreneurs ont réussi à convaincre les pouvoirs publics de son intérêt militaire. La marine britannique, poussée par l'Anglo Persian Petroleum Company et la Shell, qui souhaitaient écouler leurs stocks, s'engage dans les années 1910 dans une « pétrolisation » de l'ensemble de son parc maritime. Plus dense en énergie que le charbon, le pétrole offre aux navires un rayon d'action supérieur et une vitesse plus élevée tout en économisant de l'espace et de la main d'œuvre. Mais, lorsque Winston Churchill convainc la Royal Navy d'utiliser le pétrole au détriment du charbon, le Royaume-Uni ne dispose pas de ressources naturelles pétrolières. Il a donc fallu sécuriser cette ressource, avec les conséquences qu'on connaît sur la politique étrangère et la position géostratégique du Royaume-Uni. Le gouvernement britannique achète 51% des actions de l'Anglo-Persian et signe un contrat de 20 ans pour l'approvisionnement de la marine britannique.

La Première Guerre mondiale fut le catalyseur de la production de pétrole et des engins motorisés au pétrole. Elle requiert la présence massive de moyens de transport à moteur, comme les camions automobiles, l'aviation et l'artillerie de campagne par tracteurs. La France ne disposant pas de ressources pétrolières et l'Angleterre insuffisamment, George Clémenceau est contraint de lancer un cri d'alarme à l'intention de ses alliés américains en 1917 : « Le pétrole est aussi nécessaire que le sang dans les batailles de demain. ». La question énergétique prend alors une dimension politique.

L'économie de guerre conduit à l'explosion de la production d'engins motorisés au pétrole dont le nombre est multiplié par dix. La Première Guerre mondiale est également à l'origine du développement du transport aérien de biens et de personnes, qui se généralisera à partir des

années 1920. Par ailleurs, elle débouche sur la chute de l'Empire Ottoman, et le partage de son pétrole par les puissances occidentales, même s'il faut noter que ce sont les États-Unis qui restent le principal pays producteur de pétrole durant toute l'entre-deux guerres.

La Seconde Guerre mondiale rendra décisif le rôle de l'énergie dans les opérations militaires. En moyenne, le soldat américain de la Seconde Guerre mondiale consomme 228 fois plus d'énergie que celui de la Première (Fressoz, 2014). Aussi, le principal avantage stratégique des armées alliées réside-t-il dans leur capacité d'approvisionnement en continu dans les ressources presque illimitées du pétrole américain.

La logistique du pétrole sort transformée de la guerre : pipelines et capacités de raffinage ont augmenté brutalement pour répondre aux besoins militaires. Au sortir de la guerre, les États-Unis sont capables de produire 20 millions de tonnes de carburant d'aviation par an ; la Grande-Bretagne, à la seconde place, 2 millions seulement. Pour rentabiliser les capacités productives en kérosène ou en aluminium, les États-Unis organisent le développement de l'aviation civile. En 1944, 52 pays signent à Chicago la convention qui fonde l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), dans laquelle un article interdit la taxation des carburants d'aviation - article qui, signalons-le, complique passablement les projets actuels de taxation des transports aériens en vue de lutter contre le changement climatique.

Jean-Baptiste Fressoz (2014) dresse un tableau très complet de l'évolution des besoins énergétiques militaires. Pendant la Seconde Guerre mondiale, la troisième armée du général Patton consommait un gallon de pétrole (3,7 litres) par homme et par jour. Cette consommation passe à 9 gallons pendant la guerre du Vietnam, à 10 lors de l'opération Desert Storm et à 15 pendant la seconde guerre du Golfe. Les technologies militaires actuelles atteignent désormais des degrés inégalés de consommation énergétique : pendant l'année 2006, l'armée de l'air américaine a consommé 2,6 milliards de gallons de kérosène, soit autant que pendant la totalité de la Seconde Guerre mondiale.

D'autre part, la nécessité de sécuriser les approvisionnements énergétiques a suscité des rivalités. Yergin (1991) met en évidence comment le basculement du charbon au pétrole de la marine a été la première étape d'un siècle de rivalités et de guerres dans le Golfe Persique. Maugeri (2006) souligne, de son côté, la manière dont les États-Unis ont mis leur influence diplomatique à la disposition de leurs compagnies pétrolières. De même, l'histoire coloniale de la France est pour partie liée à ses intérêts pétroliers en Afrique de l'Ouest. Di Manno (2014, page 7) remarque en outre que "les rivalités économiques et militaires entre les États occidentaux, et leurs pratiques impérialistes pour une [...] raison qui est assez évidente, qui est celle du contrôle et de l'accès aux ressources énergétiques (pratiques impériales des États occidentaux au Moyen-Orient, les interventions françaises récentes en Afrique pour garantir à Areva un accès à l'uranium) ».

Ainsi, les opérations militaires ont généré un besoin énergétique croissant des différents États. Cette augmentation de la demande a favorisé le développement du pétrole et, dans le même temps, encouragé les conflits pour en sécuriser l'accès. Cependant, les nécessités militaires en ressources ne sont pas l'unique raison de la détermination des pouvoirs publics à sécuriser l'accès à l'énergie. Elle s'assortit de la volonté d'indépendance énergétique, qui a conduit

certaines Etats à envisager l'utilisation de sources d'énergies alternatives. L'engagement progressif de la France dans le nucléaire est à ce titre symptomatique.

Avant même la nationalisation en 1946 des compagnies d'électricité et de gaz, l'une des premières décisions prises par le gouvernement provisoire présidé par le Général de Gaulle est la création, le 18 octobre 1945, du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), placé sous l'autorité du chef du gouvernement. L'ordonnance de création du CEA lui attribue les missions suivantes : « poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans tous les domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale ; étudier la protection des personnes et des biens ; organiser et contrôler l'exploitation des matières nécessaires ; réaliser à l'échelle industrielle, la production d'énergie nucléaire ; conseiller le gouvernement en tout ce qui concerne le nucléaire et ses applications ; d'une manière générale, prendre toutes mesures qui permettent à la France de bénéficier du développement de cette branche de la science ». Le CEA doit donc permettre à la France de développer des applications civiles et militaires de l'énergie atomique et d'assurer son indépendance énergétique pour l'amener à se replacer au centre du jeu diplomatique d'après-guerre. Un double objectif qui explique comment les investissements dans le domaine du nucléaire militaire ont bénéficié au développement du programme nucléaire civil.

De 1945 à 1968, le CEA joue à la fois un rôle de promoteur et d'évaluateur. Il détient le monopole des activités scientifiques et de toutes les compétences liées à la technologie nucléaire. Grâce à l'uranium du Maroc, à l'eau lourde de Norvège et aux connaissances sur les piles venues du Canada, le CEA réussit à achever sa première pile atomique dans un délai de trois ans, une première étape indispensable vers l'objectif poursuivi par le Général de Gaulle avec la création du CEA : la capacité et l'indépendance nucléaire dans tous les domaines.

Dix ans après le lancement du CEA, en 1955, la Commission PEON (Production d'Electricité d'Origine Nucléaire), est créée afin de mettre au point la stratégie électro-nucléaire de la France. La politique du tout nucléaire est soutenue à la fois par les grands corps d'Etats, dont les diplômés intègrent les entreprises de l'énergie devenues les fleurons de l'industrie française, et par la classe politique y compris celle de l'opposition, sensible à la perspective de la création massive d'emplois publics et à l'idée d'indépendance nationale dont le nucléaire est synonyme.

Dans les années 1970, la crainte d'une raréfaction des énergies fossiles et la volonté de certains Etats de réduire leur dépendance énergétique ont favorisé l'expansion de nouvelles sources d'énergies. En 1971, la France accélère son programme nucléaire en élevant à trois par an le rythme de construction des réacteurs afin de rendre le pays moins dépendant du pétrole. En mars 1974, consécutivement au "choc pétrolier" de 1973, le plan Messmer lance un vaste programme de construction de centrales fondées sur les réacteurs de "deuxième génération", à eau légère pressurisée. Le complexe nucléo-industriel, déjà bien installé, monte en puissance avec la planification de la construction de 4 à 6 réacteurs par an jusqu'en 1985. Le passage au "tout nucléaire" pour la production d'électricité, confirmée par le président Valéry Giscard d'Estaing puis par François Mitterrand, débouche sur la construction de 58

réacteurs à eau sous pression au total répartis sur 19 sites et assurant 75% de la production d'électricité en France.

La réponse de la France à la crise du pétrole des années 70 n'est pas un cas isolé. Le Danemark, par exemple, a lancé en 1976 une série de mesures énergétiques ambitieuses, incluant des projets de prospection pétrolière et gazière en mer du Nord, la mise en place de politiques d'économies d'énergie et le développement de l'éolien, - qui l'a conduit à devenir l'un des leaders mondiaux en ce secteur. La société Vestas, positionnée depuis 1976 dans cette filière est aujourd'hui la plus importante compagnie de construction du secteur, et Dong Energy le leader de l'éolien offshore. De plus, avec 862 W/habitant en 2014, le Danemark est le pays européen le plus densément équipé dans le domaine de l'éolien.

1.3.2 La régulation de la concurrence

L'intervention des pouvoirs publics pour encadrer le prix de l'énergie s'est manifestée dans différentes régions du monde et ce tout au long du XXème siècle. Pour cela, des politiques de régulation visant à introduire le « juste » niveau de concurrence ont été mises en place. Ces politiques s'inspirent de la théorie des monopoles, des monopoles naturels et de la théorie des marchés contestables.

Un monopole de marché est une situation dans laquelle une entreprise unique intervient dans un marché donné. Cette situation peut conduire à fixer les prix à un niveau supérieur et les quantités à un niveau inférieur à ceux correspondant à l'optimum collectif. Afin de limiter l'exercice d'un pouvoir de marché, les pouvoirs publics cherchent à limiter la concentration du marché.

Cependant, certaines situations de monopole sont souhaitables, « les monopoles naturels », car ils permettent de produire plus efficacement et à moindre coût. Un monopole naturel est constitué lorsque la structure des coûts de production et la taille du marché ne permettent le maintien que d'une seule et unique entreprise sur le marché. La condition indissociable à l'existence d'un monopole naturel est qu'il y ait sous-additivité des coûts, c'est-à-dire lorsque le coût de production d'une certaine quantité de biens par une seule entreprise est inférieur à la somme des coûts de production de plusieurs entreprises qui fourniraient cette même quantité (Baumol, 1977). « Casser » un monopole naturel peut donc s'avérer contre-productif car cela empêcherait de tirer parti de la sous-additivité des coûts ou d'économies d'envergure. C'est ce qui explique que les pouvoirs publics cherchent à réglementer, sans les interdire, les monopoles naturels en veillant à ce que les prix proposés tendent vers le coût moyen de production.

La théorie des marchés contestables (Baumol, Panzar et Willig, 1982) identifie des conditions selon lesquelles des mécanismes économiques sont susceptibles de faire émerger « naturellement » la tarification au coût moyen comme tarification d'équilibre, sans qu'il soit nécessaire de les réguler. C'est le cas des marchés où interviennent des producteurs en

situation de monopole ou de quasi-monopole, qui modèrent naturellement leurs prix sous la menace de l'arrivée de nouveaux entrants. Cette théorie spécifie que, dès lors qu'un marché est contestable, c'est-à-dire qu'il n'existe de barrières ni à l'entrée, ni à la sortie, les rentes de monopole sont limitées. L'absence de barrières dépend de la présence de coûts irrécouvrables, c'est-à-dire de coûts assumés à l'entrée, indépendants du niveau et de la durée de la production, et qu'il est impossible de récupérer en sortant du marché. La présence de coûts irrécouvrables contrarie la tentation des concurrents potentiels à entrer temporairement pour se saisir du marché et capter à leur avantage le profit, le temps que la firme en place réagisse en baissant ses prix. A l'inverse, l'absence de coût irrécouvrable met le monopoleur sous la menace permanente d'un « raid » de concurrents potentiels cherchant à se saisir, même provisoirement, d'une part du marché. Pour se prémunir contre cette menace, elle doit donc réduire les incitations au « raid » en faisant tendre ses prix vers le coût marginal annulant par là même le montant du profit à saisir.

Ces éléments théoriques nous permettent de comprendre la logique de différents cas d'interventions publiques dans le domaine de l'énergie au cours du siècle dernier : par exemple le démantèlement des cartels du pétrole par les Etats-Unis en 1914, la nationalisation du secteur du gaz et de l'électricité par la France à la sortie de la Seconde Guerre mondiale ou la libéralisation des marchés de l'énergie à la fin des années 1990.

Aux Etats-Unis, l'histoire du pétrole débute en 1859 avec Ewdin Drake qui supervise la découverte d'un puits de pétrole près de Titusville pour le compte de la Senecca Oil. Alors que Drake s'occupe de l'extraction, Maugeri (2006) rappelle que John D. Rockefeller laisse, dans un premier temps, le contrôle de la production aux foreurs indépendants pour se concentrer sur le développement des segments avals de la chaîne de valeur : le raffinage et la distribution. C'est ainsi qu'en 1870, John D. Rockefeller crée la Standard Oil qui devient par la suite la raffinerie la plus rentable de l'Ohio.

La croissance du marché amène la prospérité de la compagnie. Après avoir racheté ses concurrents, Rockefeller ferme les exploitations les moins rentables et augmente la production des sites restants. Par un accord qui fit date, la Lake Shore Railroad concède en 1868 à la compagnie de Rockefeller un rabais de 71 % moyennant l'engagement de mobiliser 60 wagons chaque jour pour le transport du pétrole. Un accord dénoncé par ses concurrents, dont la production est insuffisante pour prétendre à un rabais similaire de part de la compagnie de chemin de fer. Les économies d'échelle de la Standard Oil font alors chuter le prix du baril de kérosène de 58 à 26 cents entre 1865 et 1870.

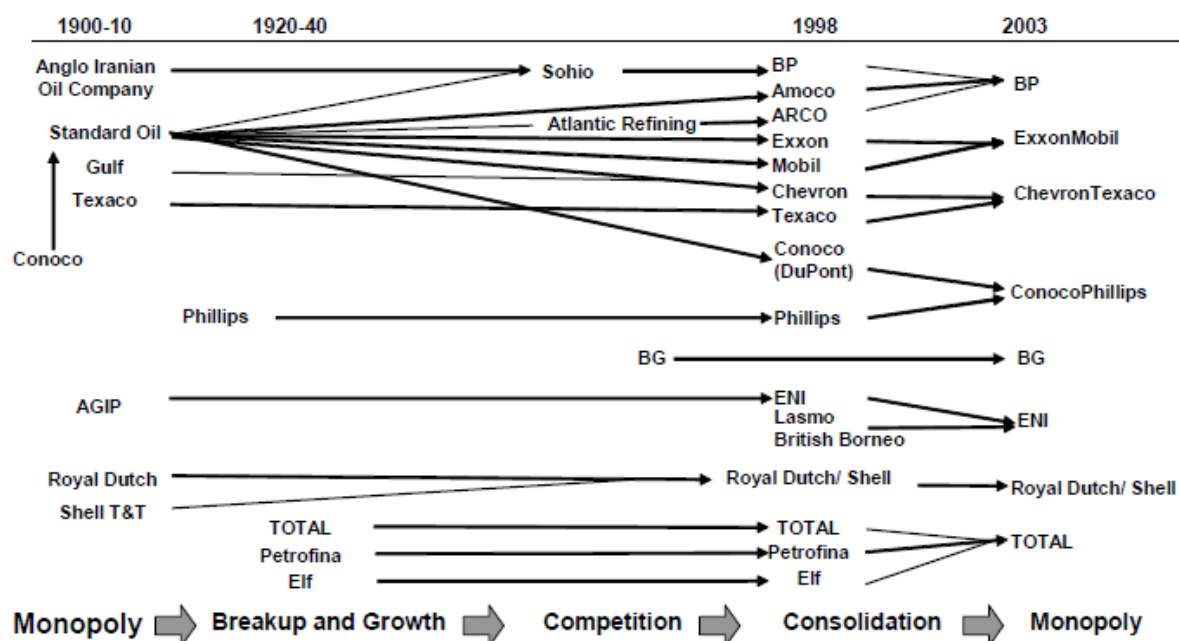
Au regard de la position dominante exercée par la Standard Oil sur le marché américain qui leur apparaît comme une puissance potentiellement nuisible aux consommateurs, les pouvoirs publics se donnent les moyens d'intervenir. En 1914, le Département de Justice américain poursuit la Standard Oil au titre du Sherman Anti Trust Act¹⁵ ce qui conduit à son démantèlement en 34 sociétés différentes. L'objectif de cette politique de régulation visait ici à limiter la concentration du marché du pétrole et diminuer ainsi son prix.

¹⁵ Votée en juillet 1890, cette loi vise à limiter les comportements anticoncurrentiels des entreprises. Le Clayton Antitrust Act du 15 octobre 1914 a complété le dispositif réglementaire.

Il est intéressant de noter que le démantèlement de la S.O. n'amena toutefois pas une baisse significative des prix, ce qui laisse à penser que son monopole était naturel car basé sur des économies d'échelle.

Les pouvoirs publics américains ont sous-estimé l'importance de la sous-additivité des coûts. Le secteur du pétrole s'est d'ailleurs concentré à nouveau plusieurs années après le démantèlement du cartel, ainsi qu'on peut l'observer sur le schéma de Bernstein (2002).

Figure 11 : Historique des phases de développement du pétrole



Source : Bernstein (2002)

En France, on peut dater la première participation de l'Etat dans le domaine de l'électricité au vote de la loi du 15 juin 1906 qui octroie aux communes le rôle d'autorités concédantes des réseaux publics d'électricité. Le texte précise que le rôle de l'Etat consiste à assurer le « contrôle de la construction et de l'exploitation [...] sous l'autorité du ministre chargé des travaux publics ». La distribution d'électricité a donc fait l'objet des premières mesures mises en place par l'Etat, car elle consiste, de-facto, en une occupation privative du domaine public et ne peut donc être réalisée sans le consentement de la collectivité propriétaire.

Jusqu'en 1919, la production d'électricité, en revanche, pouvait être mise en œuvre sans que l'autorité publique puisse intervenir autrement que par des mesures administratives du même ordre que celles dont toute autre industrie privée pouvait faire l'objet. Le développement des forces hydrauliques nécessitait de reconnaître aux hydrauliciens des prérogatives de puissance publique afin qu'ils puissent vaincre l'opposition de certains propriétaires riverains. C'est la loi du 16 octobre 1919 qui subordonne à une concession de l'Etat, l'aménagement des chutes excédant une certaine puissance et impose aux concessionnaires un certain nombre de sujétions de service public.

Quinze ans plus tard, le décret du 30 octobre 1935 renforce encore la présence de l'Etat dans l'industrie électrique. Afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement électrique et de

remédier aux dangers d'une éventuelle surproduction due à la récession économique, ce décret subordonne à une autorisation administrative préalable l'établissement ou l'extension de toute usine génératrice de plus de 1000 kilowatts destinée à fournir de l'électricité au public.

Dans les années 1930, 200 entreprises privées assurent la production, une centaine le transport et plus de mille la distribution de l'électricité. La qualité de l'approvisionnement et les tarifs de l'électricité diffèrent selon les prestataires et les régions. On estime qu'une dizaine de trusts contrôlent alors 90% du secteur électrique dont l'Union d'électricité, leader français dont la capitalisation boursière est de l'ordre de 2 milliards de francs en 1939, et l'Énergie industrielle dont la capitalisation se monte à 1,3 milliard de francs. Avant la guerre, les trusts, et la concentration qu'ils exercent, sont particulièrement décriés en raison des coûts pratiqués, des cas d'abus de leur position dominante en matière de tarifs reportés, de leur niveau particulièrement bas d'équipements (moyens de production et de transport), et de leur incapacité à mener un programme hydro-électrique ambitieux.

Après la guerre, la création d'un service public¹⁶ unique de l'électricité s'impose donc comme une nécessité. En 1946, la quasi-totalité¹⁷ du secteur de l'électricité et du gaz français est nationalisée¹⁸ lors d'un consensus remarquable entre le parti communiste, le SFIO et le MRP. La loi n° 46-628 du 8 avril 1946 sur la nationalisation de l'électricité et du gaz établit la nationalisation de la production, du transport, de la distribution, de l'importation, de l'exportation et de la fourniture d'électricité et de gaz naturel et crée Electricité de France (EDF) qui disposera du monopole public pour l'électricité¹⁹ et Gaz de France (GDF) de celui du gaz.

La nationalisation du secteur électrique et gazier répond à la nécessité de diminuer les prix de l'électricité et de généraliser son accès, dans un contexte de reconstruction et de modernisation industrielle. Pour cela, l'Etat a mis fin à la dangereuse concentration de l'industrie contrôlée, tant au niveau de la production que de la distribution, par un petit nombre de trusts dont la puissance économique ne cessait de s'accroître et dont les intérêts apparaissaient comme divergents de ceux de la collectivité. L'approvisionnement en électricité est donc devenu une mission de service public, ce qui s'est traduit par la continuité du service et l'égalité d'accès aux prestations et de traitement devant les charges occasionnées. L'implication marquée des pouvoirs publics a ici tendu à protéger les intérêts

¹⁶ L'électricité devient un service public et non pas un bien public puisqu'il ne répond pas aux conditions de non-rivalité et de non-exclusion.

¹⁷ Notons que les installations de petites tailles ainsi que celles aménagées par des producteurs désirant utiliser l'énergie pour leurs besoins propres ont pu demeurer aux mains du secteur privé sans que les fins poursuivies par le législateur ne s'en trouvent compromises.

¹⁸ La nationalisation du secteur électrique n'est pas la première nationalisation réalisée par la France dans le domaine de l'énergie. En 1924, la Compagnie Française des Pétroles est créée avec pour objectif principal de constituer des stocks stratégiques de pétrole. La loi du 30 mars 1928 donne un monopole à l'État pour décider de la quantité de pétrole importée en France, des raffineries qui le traitent, de la répartition des carburants sur le territoire national en fonction des besoins, et surtout, fixe ses prix par décret.

¹⁹ Si la France a nationalisé son secteur électrique particulièrement tôt, ce n'est pas le seul pays européen à avoir pris une telle décision. Les activités de production de transport et de distribution d'énergie électrique ont été regroupées en Italie dans la société Enel en 1967, et au Portugal dans la société EDP en 1977.

de la collectivité (contrôle de l'utilisation du domaine public, contrôle des investissements) et ceux du consommateur (règlementation, prix,...).

La forte concentration du secteur électrique avant la guerre résultait de l'importance des coûts fixes recouvrables et de la difficulté de contestation du marché, qui donnait lieu à un pouvoir de marché élevé des trusts, au détriment des consommateurs. Cette situation étant considérée comme sous-optimale, la France a souhaité récupérer le contrôle du monopole naturel et démanteler les cartels en partant implicitement de l'hypothèse que l'importance des coûts fixes liés aux réseaux avait créé une sous additivité des coûts. Elle a donc nationalisé l'intégralité du secteur électrique en considérant que l'ensemble du secteur faisait l'objet d'un monopole naturel.

Bien que certains pays européens aient engagé un mouvement de libéralisation du marché de l'énergie dès la fin des années 1980 (comme en Grande Bretagne), c'est la directive européenne (96/92/CE) concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité qui a véritablement amorcé la libéralisation du secteur à l'échelle européenne.

L'idée sous-jacente est que, dans la mesure où les entreprises sont en situation de monopole sur l'ensemble des segments de la filière électrique, elles tarifient leurs services au coût moyen et ne subissent aucune incitation à les réduire. En introduisant de la concurrence sur les segments qui peuvent y être soumis, il s'agit alors d'encourager les entreprises à réduire leurs coûts (et donc les tarifs pour les consommateurs) afin de conserver ou d'augmenter leur part de marché. Les activités de production et de fourniture (moins sujettes à la sous-additivité des coûts et pour lesquelles les coûts fixes irrécupérables sont moins importants) font l'objet d'un niveau de contestabilité plus élevé que les activités de transport et de distribution. C'est pour cette raison que la Commission européenne a souhaité introduire de la concurrence au niveau de ces segments (production et fourniture) afin d'inciter les acteurs à diminuer les coûts de production, tout en continuant à réguler les segments de la transmission et de la distribution qui constituent pour leur part des monopoles naturels. Dans la mesure où certains segments deviennent concurrentiels, la libéralisation du marché de l'électricité s'est accompagnée par la privatisation de ses acteurs.

En France, la libéralisation du marché de l'électricité se concrétise par la liberté de choix du fournisseur pour les consommateurs, la liberté d'établissement pour les producteurs (depuis 2007), le droit d'accès dans des conditions objectives, transparentes et non discriminatoires pour tous les utilisateurs des réseaux de transport et de distribution d'énergie, la mise à disposition par EDF d'un quart de sa production d'électricité d'origine nucléaire aux autres fournisseurs (loi NOME), et la fin des tarifs réglementés de vente aux professionnels. Les activités de distribution ont été filialisées au sein d'ERDF et celles de transmission au sein de RTE. EDF a été privatisée et une partie de son capital est coté en Bourse, même si l'Etat en reste le principal actionnaire (83%).

L'ouverture à la concurrence n'a pas empêché le coût de l'électricité d'augmenter, et ce en raison à la fois de l'augmentation du prix des matières premières et des investissements incontournables dans les réseaux ou le parc nucléaire. Dans le secteur de l'électricité, les fournisseurs disposent d'une marge de manœuvre limitée pour être concurrentiels. « Avec 30

% de taxes, 30 % de coûts d'acheminement et 35 % de fourniture, 95 % de la facture est réglementée, c'est-à-dire à un prix identique fixé par l'Etat », expliquait le 2 juillet 2012 dans *Le Monde*, Stéphane Mialot, alors directeur des services au Médiateur national de l'énergie. La concurrence ne peut donc s'exercer que sur 5 % du tarif.

Selon les chiffres de la Commission de Régulation de l'Energie, seulement 6,2 % des clients résidentiels ont quitté EDF pour l'un des fournisseurs alternatifs. Les deux opérateurs alternatifs, Direct Energy et Poweo, ont décidé de fusionner en 2011, pour tenter de peser davantage face aux fournisseurs historiques.

1.4 CONCLUSION

L'analyse de l'histoire de l'énergie des deux derniers siècles met en évidence trois principaux éléments.

Premièrement, les transitions énergétiques se sont toujours déroulées dans un contexte d'augmentation de la consommation énergétique. Si on a régulièrement assisté à l'émergence de nouvelles énergies dominantes, jamais aucune énergie établie n'a été évincée du mix énergétique mondial. L'introduction des nouvelles énergies s'est donc inscrite dans un processus additionnel.

Deuxièmement, si la demande et l'offre énergétiques ont coévolué, les transitions ont été impulsées par l'émergence de nouveaux besoins. Les économies d'échelle et la baisse du coût des services énergétiques dues aux progrès technologiques ont été impulsées par l'augmentation des besoins énergétiques ou leur diversifications.

Troisièmement, l'Etat a joué un rôle d'accompagnateur de ces évolutions et plus rarement d'initiateur. Il a pu réguler la concurrence afin de défendre les consommateurs ou soutenir le développement d'énergies primaires en investissant dans les infrastructures et en assurant la sécurité des approvisionnements mais n'a, qu'exceptionnellement, fortement orienté le progrès technique (le contre-exemple étant celui du déploiement du nucléaire en France).

2. LA TRANSITION « BAS CARBONE » DEROGE AUX OBSERVATIONS DES TRANSFORMATIONS HISTORIQUES

Les menaces des dérèglements climatiques sont sans commune mesure avec les problèmes environnementaux induits, dans le passé, par les activités énergétiques. Si l'augmentation de la température s'élevait significativement par rapport à celle de l'ère pré-industrielle, les équilibres économiques et sociaux actuels seraient profondément bouleversés. Pour éviter l'avènement de phénomènes catastrophiques (événements climatiques extrêmes, sécheresses, montée des eaux, pertes massives de biodiversité, ...) les négociations internationales tenues à Paris à l'occasion de la 21^{ème} Conférence des Parties²⁰ ambitionnent de maintenir l'augmentation de la température « bien en-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels » et de « poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1,5 °C ».

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, les experts du GIEC estiment qu'il est nécessaire de diviser par deux les émissions de dioxyde de carbone sur un horizon 2050 par rapport au niveau qu'elles atteignaient en 2007, ce qui représente un délai particulièrement court au regard des durées nécessaires aux transitions de l'ère pré-industrielle²¹. Ce gaz fait partie des sept gaz à effet de serre (GES)²² à l'origine du changement climatique, dès lors que leur concentration dépasse les capacités de stockage de l'atmosphère. Le CO₂ est, en outre, caractérisé par une durée de vie dans l'atmosphère particulièrement longue, de l'ordre d'un siècle, si bien que les émissions réalisées dans le passé continuent d'avoir des effets de long terme sur la température terrestre et le climat.

La combustion de l'énergie fossile a été responsable en 2013 de l'émission de 32,2 Gt CO₂. Avec une part représentant 38% des émissions de CO₂ d'origine énergétique, l'électricité est le secteur qui contribue dans les proportions les plus significatives au réchauffement climatique, cela en raison de la part élevée des énergies fossiles (gaz, charbon et pétrole) dans le mix électrique mondial (de l'ordre de 60% en 2013). De plus, le secteur électrique se distingue par son potentiel de réduction des émissions le plus important. L'AIE (2015b) met en évidence que dans le cas du scénario 2DS, les réductions d'émission de CO₂ cumulées du secteur d'ici 2050 devraient atteindre 315 Gt CO₂.

La transition vers une ère énergétique sobre en carbone est envisagée pour répondre à un défi inédit dans l'histoire : maintenir les conditions nécessaires à l'activité économique et humaine (et non pas répondre à des besoins énergétiques nouveaux). Si le secteur électrique a régulièrement évolué en se dotant successivement de nouvelles énergies primaires et de nouveaux systèmes de conversion, il est soumis à une transformation d'envergure dans le but de décorrélérer le niveau de production d'électricité des émissions générées.

²⁰ <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/l09f.pdf>.

²¹ Cf. Chapitre I, section [1.1.2 Des transitions à intervalles rapprochés](#).

²² Les sept GES à l'origine de l'augmentation des températures sont le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, l'hydrofluorocarbure, le perfluorocarbure, l'hexafluorure de soufre et le trifluorure d'azote.

Nous étudierons, en premier lieu, les mécanismes aboutissant au réchauffement du climat et à la responsabilité du secteur énergétique dans les émissions de CO₂. Nous mettrons en évidence les objectifs de réduction établis par l'AIE permettant de limiter la température en deçà du seuil critique de 2°C et la période de temps requise pour cet objectif. Ces éléments nous permettront de singulariser la transition bas carbone par rapport aux précédentes transitions rencontrées dans l'histoire en mettant notamment en lumière la nécessité pour les Etats de coopérer et coordonner leurs efforts. Nous soulignerons, en outre, les difficultés des négociations climatiques internationales dues au principe de « différenciation » exprimé lors de la « Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement²³ » qui oppose, d'une part, les pays industrialisés à l'origine du stock de carbone présent dans l'atmosphère et, d'autre part, ceux en développement qui contribuent aujourd'hui dans des proportions significatives au flux de CO₂ présent dans l'atmosphère.

Puis, dans un second temps, nous analyserons le cas particulier de la transition du secteur électrique européen. L'Europe s'est donnée des objectifs de lutte contre le réchauffement climatique parmi les plus ambitieux au monde. Cela signifie que, dans cette région, la transition du secteur électrique devra suivre une trajectoire différente de celle mise en œuvre à l'échelle internationale. En outre, les mécanismes observés lors des précédentes transitions, caractérisés notamment par un processus d'addition énergétique et le rôle déterminant de la demande, ne pourront pas jouer un rôle dans le cadre de la transition vers une économie bas carbone, puisqu'il s'agira de réduire drastiquement le recours à certaines énergies primaires, comme le charbon et d'opérer, dès lors, une substitution.

2.1 UNE TRANSITION SOUS CONTRAINTE DE TEMPS NECESSITANT DES POLITIQUES PUBLIQUES INEDITES

Si les émissions de gaz à effet de serre sont nécessaires pour que la température terrestre soit viable pour l'espèce humaine²⁴, on assiste, à partir de 1750, à une forte croissance du niveau de concentration des GES dans l'atmosphère conduisant à une augmentation sans précédent de la température. En mars 2015, la concentration atmosphérique en équivalent CO₂ a dépassé pour la première fois le seuil de 400 particules par milliers (NOAA, 2015), soit une augmentation de + 30 % par rapport aux maxima cycliques observés depuis 400 000 ans. Le GIEC (2014) révèle, en outre, que la température en 2013 était supérieure de 0,63°C par rapport à la moyenne des températures du XX^{ème} siècle.

Selon le GIEC, cette tendance devrait se poursuivre au cours du XXI^{ème} siècle. Les émissions de GES conduiraient à l'augmentation de la température moyenne terrestre dans un ordre de grandeur compris entre +1°C (scénario RCP 2,6) et +3,7°C (scénario RCP 8,5) d'ici

²³ http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/9/Dclaration_de_Rio_1992_fr.pdf

²⁴ La température du globe s'élève en moyenne à +14°C. Elle atteindrait seulement -19°C sans la contribution des gaz à effet de serre.

2100 par rapport au niveau constatés entre 1986 et 2005. Ces « estimations » représentent des valeurs moyennes, au sein d'une fourchette plus large allant de +0,3 à +4,8°C (GIEC, 2013).

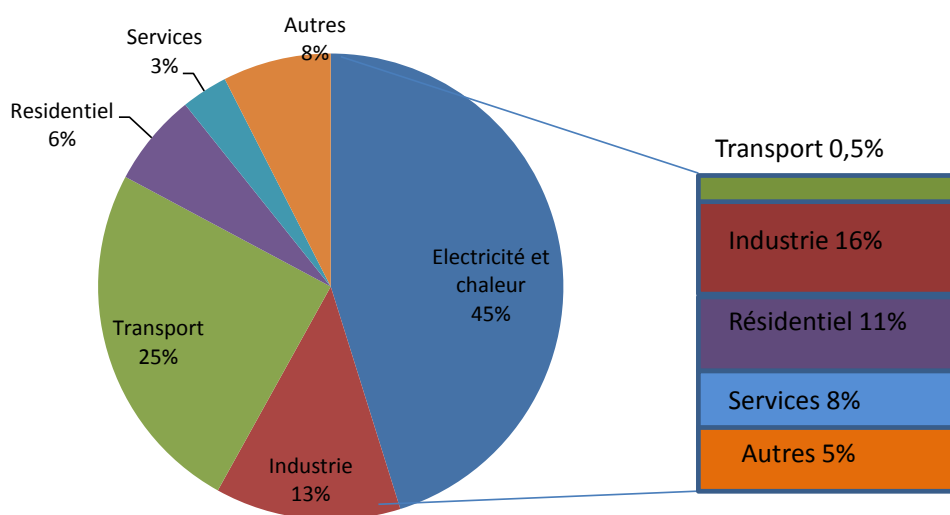
Le GIEC (2013, page V) estime « avec 95 % de certitude que depuis le milieu du XXème siècle, l'activité humaine est la cause principale du réchauffement observé. ». Le développement des activités humaines est à l'origine de l'émission des GES (qui sont alors qualifiés « d'anthropiques²⁵ ») amplifiant l'effet de serre naturel et causant une augmentation de la température atmosphérique. Les experts estiment qu'une augmentation de la température supérieure à 2°C d'ici 2050 par rapport au niveau constaté durant l'ère pré-industrielle, aurait des conséquences catastrophiques pour l'activité humaine. On assisterait à la fonte des neiges et des glaces, à l'augmentation du niveau des eaux, à des sécheresses sans précédent et à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes. Ces événements conduiraient à la migration massive des populations issues des zones les plus sensibles et auraient aussi des effets drastiques sur l'activité économique (secteur de l'énergie, agroalimentaire, assurance...). De plus, l'augmentation de la température de plus de 1,5°C par rapport à l'ère pré-industrielle conduirait à des catastrophes pour les pays insulaires qui pourraient se voir submerger par la montée du niveau des mers.

Parmi les gaz à effet de serre, intéressons-nous au cas particulier du CO₂. Si ce gaz possède le pouvoir de réchauffement global plus faible que les autres GES, il est néanmoins celui qui a le plus contribué au réchauffement du climat depuis 1750 (MEDEE et I4CE, 2015). Le niveau des émissions de CO₂ est hétérogène en fonction des secteurs d'activité et des zones géographiques.

La répartition mondiale des émissions de CO₂ en 2013 (figure 12) met en évidence le rôle de trois principaux secteurs dans le réchauffement climatique: la production d'électricité et de chaleur (45%), les transports (25%) et l'industrie (18%) caractérisés par l'usage intense des énergies fossiles.

²⁵ Notons que Andrew Revkin a été à l'origine de l'introduction du terme « anthropocène » en 1992, formulation qui a, par la suite, été popularisée par le prix Nobel de Chimie Paul Crutzen pour désigner l'ère géologique actuelle marquée par l'influence des hommes sur la biosphère et le climat.

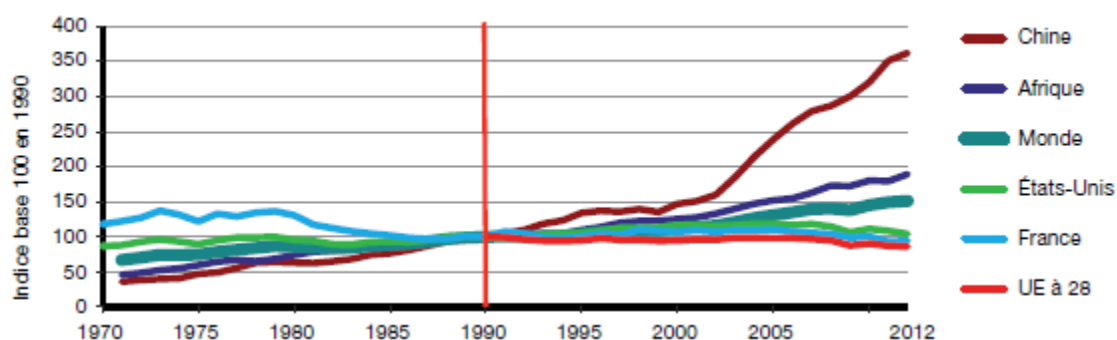
Figure 12 : Répartition des émissions mondiales de CO₂ par secteur en 2013



Source : auteur, à partir de AIE (2015c)

Chaque pays ne disposant pas du même niveau d'industrialisation²⁶, les trajectoires des émissions et leur niveau absolu sont très différents. Par exemple, dans le cas de l'énergie, on assiste, depuis les années 1990, à une croissance particulièrement soutenue du niveau des émissions de l'Afrique et de la Chine alors que celle, de l'Europe et des Etats Unis restent comparativement stables.

Figure 13 : Emissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie dans le monde



Source : AIE (2014b)

Afin de contenir l'augmentation de la température en deçà du seuil critique de 2°C, l'AIE estime qu'il est nécessaire de diviser par deux, à horizon 2050, les émissions par rapport au niveau observé en 2011 (AIE, 2014c). Ce qui nécessite de repenser structurellement les

²⁶ Nous avons vu dans le Chapitre I, section [1.2 La dynamique de la diffusion des technologies énergétiques](#) que le niveau de consommation énergétique, et donc des émissions de CO₂, est étroitement lié au niveau d'industrialisation.

systèmes énergétiques et, par conséquent, de modifier les énergies primaires utilisées, les procédés de conversion et les usages de l'énergie.

Au regard du danger que représente le réchauffement climatique, et de son échelle globale, une collaboration entre les Etats est indispensable pour lutter efficacement contre les émissions de gaz à effets de serre. Premièrement, l'efficacité d'une action unilatérale des pays industrialisés pourrait être réduite par ce qu'il est convenu d'appeler des « fuites de carbone ». Une réduction des émissions de carbone dans les pays industrialisés accroîtrait l'avantage comparatif des autres pays pour la production de produits à forte intensité énergétique. Ces activités pourraient se déplacer, en conséquence, pour échapper aux mesures de réduction des émissions, sans pour autant que leur niveau ne soit diminué. Deuxièmement, le coût de la réduction des émissions n'étant pas égal dans toutes les régions du monde, une collaboration à l'échelle internationale permettrait d'optimiser le coût de réduction des émissions.

Or, le processus de négociation est contraint par ce qu'il est convenu d'appeler le principe de « différenciation ». Les gaz à effet de serre, et le CO₂ en particulier, disposent d'un effet de traîne, c'est-à-dire que ces gaz continuent d'être présents dans l'atmosphère pendant plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'années après avoir été rejetés. Cela signifie que les pays industrialisés (au premier rang desquels on compte l'Europe et les Etats-Unis) sont principalement responsables du « stock » de CO₂ alors que les pays en cours d'industrialisation sont responsables de la majeure partie des flux actuels. Tout l'enjeu des négociations internationales réside donc dans la capacité des Etats à trouver le juste arbitrage entre le niveau de responsabilité historique et actuel dans le réchauffement climatique. La première Conférence des Parties s'est tenue à Rio en 1992 et a posé les fondements de la coopération internationale en matière de changement climatique. Cette « convention climat »²⁷ repose sur le principe de « responsabilité commune mais différenciée » face au changement climatique. Ce qui signifie que chaque Etat porte une part de responsabilité collective mais ne dispose pas du même niveau de responsabilité en fonction de son développement²⁸. Au nom du principe d'équité, les pays ont été classés en deux groupes: les pays industrialisés²⁹ responsables des trois quarts des émissions mondiales de gaz à effet de serre accumulées depuis 1880 et les pays dits « en voie de développement » dont la priorité est de mobiliser des ressources pour leur développement³⁰. Cette configuration renvoie donc les pays industrialisés à leur responsabilité historique dans le réchauffement climatique alors que le niveau de contrainte de pays tels que l'Inde ou la Chine (premier émetteur mondial de CO₂ en 2014) est relativement modéré au regard du niveau actuel de leurs émissions. Lors de

²⁷ Instaurée à partir de la convention cadre des Nations Unis, la convention Climat est articulée autour de la Conférence des Parties (COP) et de deux organes subsidiaires : l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique et l'Organe subsidiaire pour la mise en application. Cependant, ni la COP ni ses instances ne doivent être considérées comme un gouvernement international sur l'évolution du climat.

²⁸ Il s'agit du principe 7 de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement (ONU, 1992).

²⁹ L'Annexe B du protocole de Kyoto précisait les engagements de réduction des émissions de 38 pays industrialisés et de l'Union européenne dans son ensemble.

³⁰ L'AIE estime que d'ici 2050, les émissions de CO₂ des pays de l'OCDE, représentant actuellement près de la moitié des émissions mondiales, n'en représenteront plus que 25 % seulement. Dans le même temps la part des pays en développement atteindra environ 60 %. Cette modification des équilibres en présence contraint le processus de négociation.

la COP 21, si le principe de « responsabilité commune mais différenciée » a été confirmé, l'accord de Paris ne distingue pas les pays industrialisés et pays en développement, comme cela fut le cas au moment de la signature du protocole de Kyoto.

Les premières avancées majeures des négociations internationales se sont manifestées par la mise en place du protocole de Kyoto entré en vigueur en 2005. A cette occasion, les pays développés s'étaient engagés à réduire de 5,2% le niveau de leurs émissions d'ici 2012 par rapport à 1990. Ces engagements ont pu être, au niveau global, tenus. Pour l'Europe, par exemple, l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) indique que la réduction de gaz à effet de serre a atteint -17,5% entre 1990 et 2011 et la France a annoncé avoir réduit ses émissions de 12% en 2011 par rapport à 1990. Une réussite que l'on doit pondérer par deux éléments indépendants de l'efficacité des politiques climatiques, et qui ont facilité l'atteinte de ces objectifs : l'effondrement des pays de l'ancien bloc soviétique et le ralentissement économique lié à la crise.

En 2015, la 21ème édition de la Conférence des Parties a donné lieu à la signature de l'accord de Paris. Cet accord « vise à lier l'ensemble des pays dans un système d'engagements à partir de leurs contributions nationales qui devraient graduellement intégrer un dispositif commun de mesure et vérification sous l'égide des Nations-Unies avec une clause de révision quinquennale interdisant tout retour en arrière » (de Perthuis, 2015, page 1). Il confirme, en outre, l'objectif de « contenir l'élévation de la température moyenne en-dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels » et ambitionne, pour la première fois, de poursuivre les efforts pour « limiter l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux pré-industriels ». Pour cela, l'Accord de Paris prévoit que les Etats s'engagent sur des trajectoires de réduction selon une base volontaire. A partir de 2020, les engagements doivent être revus tous les cinq ans. En outre, l'Accord reconnaît la responsabilité différenciée en proposant, à partir de 2020, de consacrer chaque année un montant plancher de 100 Md\$ dollars alloués par les pays industrialisés au financement des projets permettant aux pays les plus pauvres de s'adapter aux changements climatiques ou de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Chaque Etat a donc l'obligation d'établir une liste de ses engagements et de mobiliser des actions pour les mettre en œuvre. De plus, l'article 13 de l'Accord prévoit un mécanisme de transparence qui permettra à un comité d'experts internationaux de vérifier les informations fournies par chaque pays en termes de suivi de ses émissions et des progrès accomplis pour les réduire³¹. Il est à noter, comme le souligne Matthieu Wemaëre, avocat et expert en droit du climat que « du point de vue du droit international, l'accord n'est pas à strictement parler contraignant dans la mesure où il ne prévoit pas de mécanisme coercitif ou de sanction pour les pays qui ne respecteraient pas leurs engagements »³².

³¹ Notons d'ailleurs que, contrairement au protocole de Kyoto, ce mécanisme de suivi, notification, vérification, s'appliquera non seulement aux pays développés mais également à ceux en développement

³² http://www.lemonde.fr/cop21/article/2015/12/14/l-accord-de-paris-sur-le-climat-est-il-vraiment-juridiquement-contraignant_4831255_4527432.html

L'urgence de la lutte contre les dérèglements climatiques nécessite de réaliser la transition bas carbone dans des délais de l'ordre de cinquante ans. Cette période représente une durée nettement inférieure à celles des précédentes transitions³³, comprises entre 80 et 100 ans.

Aussi, cette contrainte temporelle oblige-t-elle les Etats à jouer un rôle très différent de celui observé dans les transitions du passé.

Alors que face à la question énergétique, les Etats ont majoritairement entretenu au cours du XXème siècle des relations non coopératives pour assurer la sécurité des approvisionnements³⁴, allant même jusqu'au conflit, ils sont désormais tenus de coopérer. Cette situation est d'autant plus singulière que la transition énergétique devra être mise en œuvre dans un délai de l'ordre de quelques décennies pendant lesquelles l'accès aux ressources fossiles continuera à représenter un enjeu stratégique pour les Nations. Les pays continueront donc à entretenir une forme de compétition pour l'accès aux énergies fossiles alors même qu'ils doivent, dans le même temps, coopérer pour limiter les émissions de GES, ce qui représente une situation unique dans l'histoire.

Par le passé, le rôle des Etats s'est le plus souvent limité à accompagner et à encadrer le développement des énergies en régulant la concurrence³⁵ ou en investissant dans des infrastructures stimulant la demande. Il s'agira donc de repenser, en profondeur, les politiques énergétiques. En particulier, les Etats devront mobiliser, pour la première fois, des instruments économiques pour modifier le comportement des acteurs dans des délais particulièrement courts en instaurant un « signal-prix ». Une analyse théorique des instruments économiques et une présentation des principaux instruments mobilisés sont proposées dans le chapitre suivant³⁶.

2.2 LE CAS DU SECTEUR ELECTRIQUE EN EUROPE

Comme vu précédemment, la contribution au réchauffement climatique est hétérogène selon les secteurs et les zones géographiques. Nous souhaitons concentrer notre attention sur la transition bas carbone du secteur électrique en Europe, qui représente un cas d'étude intéressant pour les trois raisons suivantes. Premièrement, la chaîne de valeur du secteur de l'électricité est particulièrement complexe. Pour produire de l'électricité, le secteur s'appuie sur des infrastructures de génération dont les durées d'amortissement sont particulièrement longues (de l'ordre de plusieurs décennies), ce qui représente un obstacle à la mise en place rapide de nouveaux systèmes disposant de performances environnementales supérieures. La question des réseaux doit faire l'objet d'une attention particulière, car l'équilibre en temps réel entre l'offre et la demande doit être assuré pour éviter un black out du système. Deuxièmement, le secteur électrique est amené à jouer un rôle majeur pour lutter contre le réchauffement climatique puisqu'il est le secteur à l'origine de la part la plus importante des

³³ Cf. Chapitre I, section [1.1.2 Des transitions à intervalles rapprochés](#).

³⁴ Cf. Chapitre I, section [1.3.1 La sécurité énergétique](#).

³⁵ Cf. Chapitre I, section [1.3.2 La régulation de la concurrence](#).

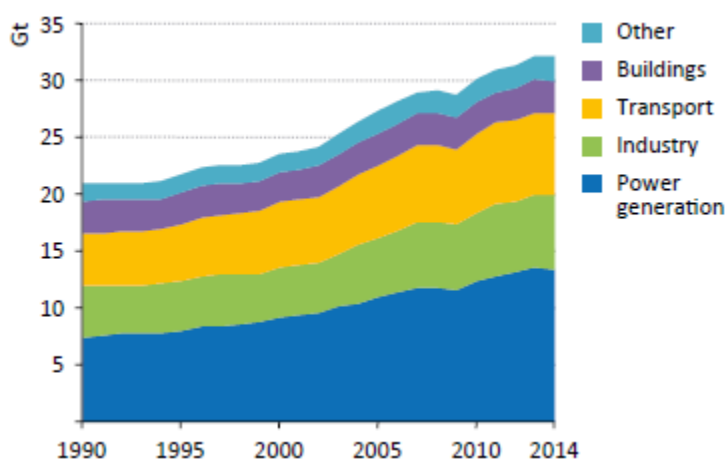
³⁶ Cf. Chapitre II, section [2.1 L'intervention des autorités publiques](#).

émissions et parce qu'il dispose du potentiel de réduction le plus important. Troisièmement, la transition du secteur électrique en Europe sera singulière autant du point de vue historique que géographique. Les mécanismes observés lors des précédentes transitions ne pourront être mis en œuvre et la trajectoire de la transition poursuivie dans cette région est très différente de celle qui est envisagée à l'échelle internationale.

2.2.1 Vers une nouvelle dynamique de diffusion des technologies énergétiques

En 2013, selon l'AIE (2015a), le secteur de la production d'électricité était à l'origine de l'émission de 12,4 Gt CO₂, soit près de 40% des émissions de CO₂ dues à l'énergie. Après une hausse continue depuis 1971, le niveau de ses émissions a provisoirement reculé en 2008 (diminution de 1,7 % des émissions par rapport à 2009, résultant de la crise économique) avant de reprendre sa croissance l'année suivante.

Figure 14 : Evolution des émissions de CO₂ mondiales par secteurs



Source : AIE (2015d)

En 2013, les émissions du secteur électrique atteignaient 0,84 Gt CO₂ en Europe (AIE, 2015c), ce qui s'explique par un mix électrique et une consommation reposant chacun à hauteur de 50% environ sur les énergies fossiles. Il est important de noter qu'en Europe, les émissions rejetées dans l'atmosphère en 2013 reculent d'environ 10% par rapport au niveau enregistré en 1990. Un ralentissement qui s'explique par la crise économique qui frappe le monde, et l'Europe en particulier, depuis 2008 et par les mesures prises dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, pour laquelle l'Europe s'est fixé des objectifs parmi les plus ambitieux à l'échelle internationale.

En Europe, la lutte contre le réchauffement climatique s'est structurée dès 2005 avec le lancement du marché des quotas instaurant, pour la première fois à l'échelle internationale, un signal-prix pour orienter les investissements vers des solutions bas carbone³⁷. En 2007, les

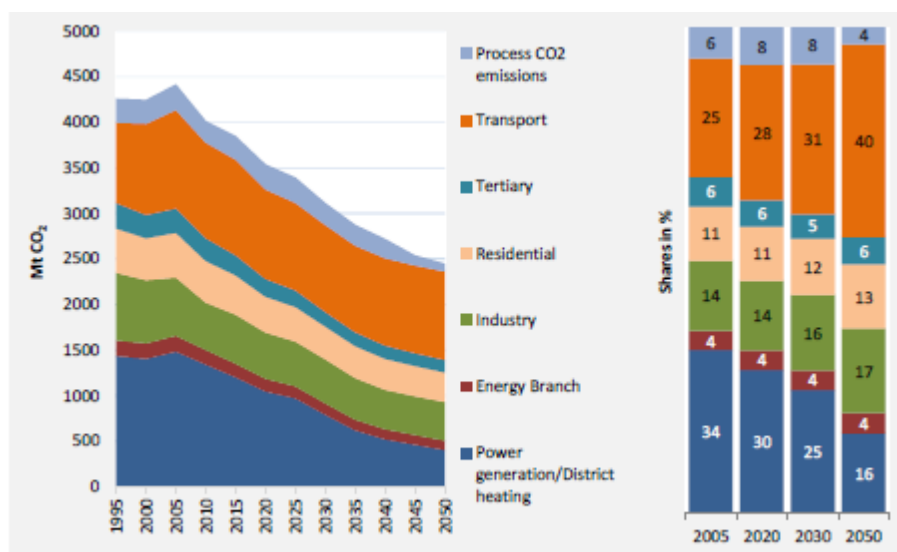
³⁷ Le marché européen des quotas fera l'objet d'une analyse détaillée dans le Chapitre II, [section 2.1 l'intervention des autorités publiques](#).

Etats membres se sont accordés sur le premier Paquet Energie Climat qui prévoyait, à horizon 2020, la diminution de 20% des émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990, l'augmentation de 20% de l'efficacité énergétique et l'augmentation à hauteur de 20% de la part d'énergie renouvelable dans la consommation finale énergétique. En 2011, la Commission européenne publie la « Feuille de route vers une énergie compétitive à faible intensité carbone à horizon 2050 », qui a pour but de servir de guide à l'action de l'Union pour réduire ses émissions dans des proportions de l'ordre de 80 à 95 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990. Pour tenir cet engagement, les réductions d'émissions du secteur électrique devraient être comprises entre 93% et 99%. En outre, ce document insiste sur la nécessité de fixer des objectifs contraignants au-delà de 2020 afin d'inciter les acteurs à investir rapidement dans des solutions bas carbone et limiter ainsi le coût de la lutte contre le réchauffement climatique. Or, en 2011, les objectifs n'étaient formalisés que jusqu'en 2020, d'où la tentation pour certains acteurs de différer leurs investissements, et une augmentation subséquente de leur coût. Afin de fixer un cadre sur un horizon plus lointain, l'Union européenne trouve en 2014 un accord sur le « Paquet Energie Climat 2030 », prévoyant de limiter les émissions a-minima de 40% par rapport à 1990, d'augmenter l'efficacité énergétique de 27% par rapport à cette même année de référence et de porter la part des énergies renouvelables à 27% dans la consommation énergétique finale.

En 2013, soit six mois avant les accords du Paquet Energie Climat 2030, la Commission européenne publie le rapport « EU Energy, Transport and GHG Emissions, Trends to 2050 ». Ce rapport présente un scénario énergétique à horizon 2050 (« EU Reference Scenario 2013 ») qui s'appuie sur 75 directives européennes en faveur de la réduction des émissions, des données macroéconomiques (croissance, évolution des taux,...) et mobilise le modèle PRISMES pour établir des simulations. En analysant les résultats du modèle et en les comparant à la dynamique de la transition énergétique du secteur électrique à l'échelle mondiale, on en retire les quatre enseignements suivants spécifiques à la transition énergétique du secteur électrique européen.

Premièrement, par rapport à ce qui est observé à l'échelle mondiale, il apparaît que le secteur européen de l'électricité est actuellement responsable de la quantité la plus importante d'émissions de CO₂ et qu'il sera le premier contributeur en termes de réduction d'émissions. Les études prévoient ainsi que, comparativement au niveau de 2005, les réductions d'émission devraient atteindre 45% en 2030 et 70% en 2050. Notons que ce potentiel de réduction à horizon 2050 est inférieur à l'objectif fixé par la Commission européenne (2011b) qui envisage pour le secteur électrique une réduction comprise entre 83 et 99%.

Figure 15 : Evolution des émissions de CO₂ par secteur en Europe



Source : CE (2013a)

Deuxièmement, avec une augmentation annuelle de la consommation d'électricité de l'ordre de + 0,2% par an, l'Europe connaîtra la plus faible croissance de la consommation électrique à l'échelle mondiale (estimée à 2% par an d'ici 2040 selon le New Policies Scenario, AIE 2015) et cela malgré les nouveaux usages de l'électricité dans les secteurs du transport et du chauffage/refroidissement³⁸. L'augmentation de la demande devrait être compensée par les gains d'efficacité dus aux réglementations relatives à l'efficacité énergétique³⁹. Alors que, jusqu'à présent, l'effet rebond (Jevons, 1865) permettait d'expliquer que ces gains d'efficacité énergétique des centrales ne compensent pas l'augmentation de la demande⁴⁰, pour la première fois dans l'histoire, des progrès en termes d'efficacité énergétique permettraient de limiter le niveau de la demande.

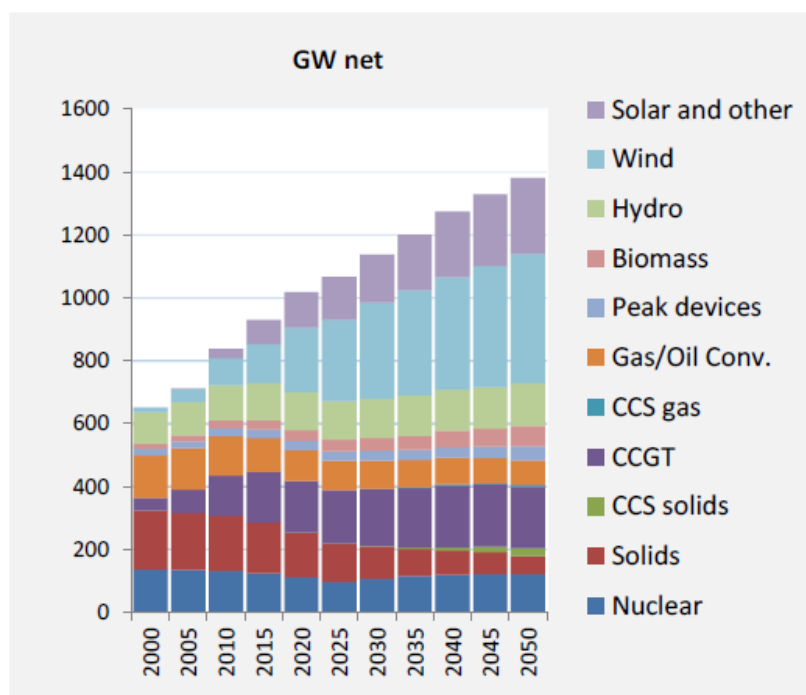
Troisièmement, la transition vers l'ère bas carbone appellera les acteurs du secteur électrique à gérer la dualité de leurs objectifs : poursuivre - mais diminuer - l'usage des technologies thermiques (en veillant à en améliorer les performances à travers notamment le CCS ou la cogénération) tout en adoptant, dans le même temps, une gamme de technologies bas carbone. Ainsi, sur la base des hypothèses formulées par l'EU Reference Scenario 2013, la part des capacités utilisant en intrant des énergies fossiles (qui représentait, en 2013, 50% des capacités de production installées, CE, 2015) devrait être limitée à horizon 2050 à 34% des capacités totales en Europe, dont 3% de CCS et 11% de cogénération (CE, 2013a).

³⁸ Ces nouveaux usages de l'électricité se manifestent par une augmentation de l'énergie dans la demande finale d'électricité qui passerait selon la Commission Européenne de 21% aujourd'hui à 28% en 2050 (EU, 2014).

³⁹ La Commission Européenne (CE, 2013a) estime d'ailleurs que sans les réglementations sur l'efficacité énergétique, la croissance de la demande en électricité atteindrait 1% par an, soit cinq fois le niveau estimé

⁴⁰ Cf. Chapitre I, section [1.2.2 La diversification des besoins énergétiques](#).

Figure 16 : Estimation de l'évolution des capacités installées en Europe



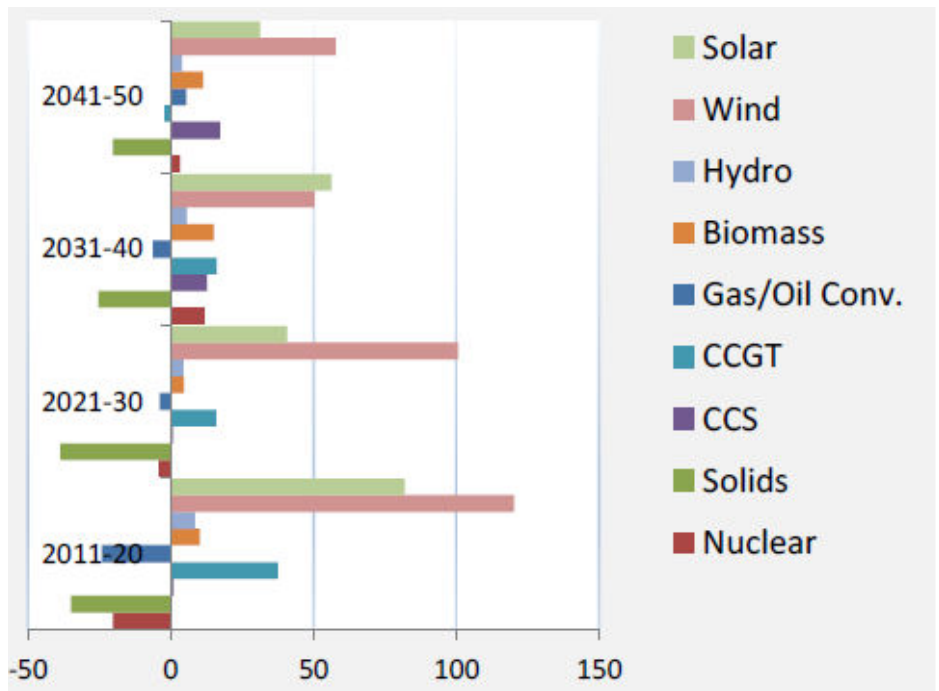
Source : CE (2013a)

Quatrièmement, il apparaît que la transition du secteur électrique en Europe ne suivra pas la même dynamique que celle observée dans le monde (figure 17a et b). A l'échelle globale, la situation anticipée par le New Policies Scenario (AIE, 2015a) fait état de l'ajout, d'ici 2040, de nouvelles capacités pour la plupart des énergies⁴¹, y compris pour le charbon. A l'opposé pour l'Europe, l'EU Reference Scenario 2013 met en évidence un mécanisme de substitution caractérisé par l'augmentation des capacités renouvelables et des centrales à gaz, concomitant à la diminution de celles à charbon. Sur la base de l'EU Référence Scenario 2013, la Commission européenne (CE, 2013a) estime que la part des centrales thermiques à charbon devrait chuter de 21% en 2010 à moins de 6% en 2050 puis progressivement disparaître après cette échéance.

⁴¹ Seul l'usage du pétrole qui représente à peine 4% de la génération d'électricité en 2013 (AIE, 2015, WEO) a vocation à quasiment disparaître. Selon l'AIE, il ne représenterait, à horizon 2040, seulement 1% de la génération d'électricité.

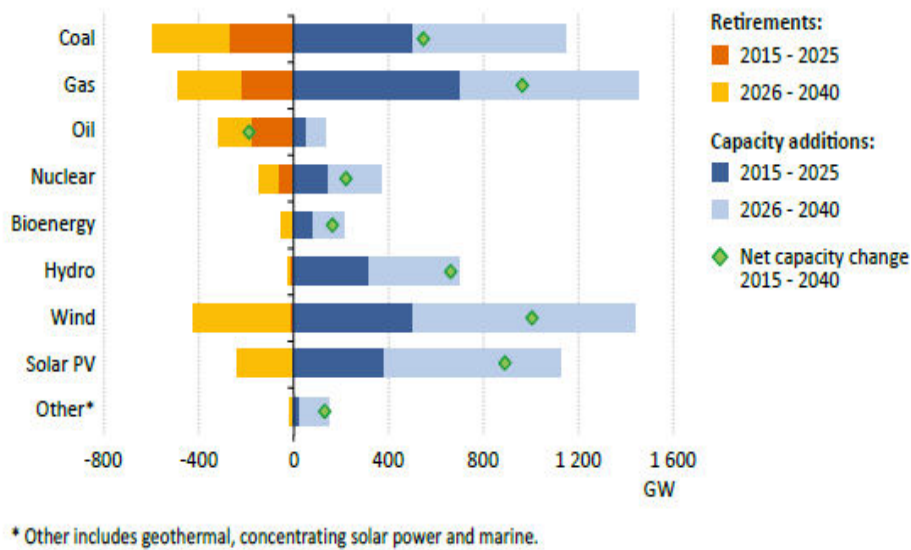
Figure 17 : Comparaison de l’anticipation de l’évolution nette des capacités de production électrique en Europe et dans le monde

Figure 17a, Europe, selon l’EU Reference Scenario 2013, période 2010-2050



Source : CE (2013a)

Figure 17, b Monde, selon le New Policies Scenario, période 2015-2040



Source : AIE (2015a)

Ces différents éléments nous conduisent à conclure que la dynamique de la transition bas carbone du secteur électrique européen sera unique tant d'un point de vue historique que géographique. Depuis 200 ans, de nouveaux besoins (chauffage, éclairage, mobilité, appareils ménagers, industrie ...) ont créé de nouveaux marchés conduisant à l'augmentation de la consommation d'énergie. Ces nouveaux besoins ont pu être satisfaits grâce à l'addition successive d'énergies primaires et à l'évolution du progrès technique : introduction de nouveaux systèmes de conversion puis amélioration de ces systèmes à travers une puissance supérieure et une meilleure efficacité énergétique. La flexibilité de l'électricité a permis d'utiliser en intrant des énergies primaires variées adaptées aux besoins de pointe ou de base et procurant une grande diversité d'usages. Or, l'objectif de la transition bas carbone consiste à répondre à un problème d'externalités. S'agissant de limiter les externalités négatives des émissions, il ne s'agit ni de répondre à de nouveaux besoins énergétiques ni de créer de nouveaux services énergétiques.

Dans ces conditions, les électriciens européens sont confrontés à un double défi :

Tout d'abord, la nature même du progrès technique attendu pour décorrélérer la production d'électricité du niveau des émissions est très différente de celle historiquement observée, qui se manifestait par l'introduction successive de nouveaux systèmes de conversion dotés d'une puissance toujours plus grande et d'une efficacité croissante. Pour assurer la transition énergétique, les électriciens devront mobiliser une variété de technologies qui concernent l'ensemble des segments de la chaîne de valeur : au niveau de la production (énergies renouvelables, CCS ...), mais également au niveau du transport et de la distribution d'énergie (smart grids).

Ensuite, un mécanisme exclusif d'addition technologique, comme il s'est appliqué par le passé et qu'il est amené à s'appliquer dans le futur à l'échelle mondiale, ne pourra pas se manifester en Europe. Les électriciens européens devront mobiliser des procédés qui relèvent de l'addition technologique et de la substitution technologique. Les technologies de substitution sont celles qui ont vocation à remplacer les technologies en place (par exemple, les énergies renouvelables qui vont se substituer aux centrales à charbon). En outre, les technologies d'addition, ne permettront pas de produire de l'électricité à partir de nouvelles énergies primaires mais porteront sur l'amélioration des systèmes existants (les smart grids amélioreront les performances des réseaux actuels, le CCS améliorera les performances environnementales des centrales).

2.2.2 Focus sur cinq domaines technologiques bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique

Nous avons vu dans la section précédente que la structure du mix électrique européen est amenée à significativement se modifier d'ici 2050⁴². C'est la première fois dans l'histoire

⁴² Cf. Figure 16 : [Estimation de l'évolution des capacités installées en Europe](#)

qu'une transition énergétique résultera de l'introduction simultanée dans le système de diverses technologiques qualifiées de « bas carbone », extrêmement variées. Une hétérogénéité qui porte, à la fois sur leur potentiel respectif de niveau de réduction d'émissions de CO₂, leur position sur la chaîne de valeur, ou leur niveau de maturité.

Sont ainsi considérés comme des technologies bas carbone, les systèmes de conversion fondés sur les énergies renouvelables (éolien, énergie des mers, solaire...) qui ont vocation à se substituer au charbon et au fuel et ceux qui continuent de s'appuyer sur les énergies fossiles mais offrent des performances environnementales plus élevées⁴³ que les centrales thermiques en place. La fission nucléaire, déjà largement diffusée, système de conversion thermique qui ne nécessite pas l'usage d'énergies fossiles pour produire de l'électricité. Les dispositifs de captage et de séquestration du carbone, qui s'ajouteront aux dispositifs de conversion thermique, permettant ainsi de poursuivre l'usage des énergies fossiles tout en limitant dans des proportions spectaculaires leurs émissions. Enfin, les réseaux intelligents (smart grids) qui, en plus de favoriser l'introduction des énergies renouvelables, visent également à renforcer l'efficacité énergétique du système électrique et contribueront donc à double titre à la réduction des émissions. L'établissement de réseaux intelligents couvre, en outre, toute une variété de segments : interconnexion des réseaux entre eux, gestion de la demande, borne de recharge pour les véhicules électriques ...

Au sein du portefeuille technologique qui sera mobilisé pour réaliser la transition énergétique du secteur électrique, nous concentrerons notre attention sur les cinq domaines bas carbone suivants : les énergies renouvelables, le CCS, les smart grids, la fission nucléaire et l'hydrogène. Tout d'abord parce qu'au regard de leur potentiel de réduction des émissions, ces domaines constitueront une part significative du mix électrique européen mis en place à horizon 2050 pour tenir les engagements de l'Europe (CE, 2013a). De plus ils concernent l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production (énergies renouvelables), à la distribution (smart grids) en passant par les dispositifs de captage. Ensuite, parce que ces domaines recouvrent aussi bien des technologies déjà matures (fission nucléaire) que des technologies émergentes (énergies des mers, CCS ...). Enfin, parce que ce panel présente un certain équilibre entre technologies de substitution et technologies d'addition, permettant ainsi d'apprécier de façon plus globale la singularité de la transition énergétique du secteur électrique en Europe. Alors que la fission nucléaire, le CCS et les smart grids⁴⁴ relèvent de « l'addition » technologique, puisqu'ils consistent à renforcer des éléments déjà présents dans le système électrique actuel, l'hydrogène et les énergies renouvelables s'inscrivent dans une démarche de substitution technologique et ont vocation à structurellement remplacer certaines technologies déjà établies.

⁴³ Par exemple, les centrales à cycle combiné (CCGT) offrent une efficacité énergétique de plus de 60% contre 37% pour les centrales à gaz classiques.

⁴⁴ Bien que les smart grids favorisent l'introduction des énergies renouvelables qui relèvent de la substitution, nous les classons dans la catégorie des technologies d'addition car ils permettent d'améliorer le système existant en y ajoutant des capteurs, des systèmes de télécommunication et des logiciels.

Nous commencerons par étudier les principales caractéristiques⁴⁵ des technologies relevant de l'addition avant de nous pencher sur celles relevant de la substitution.

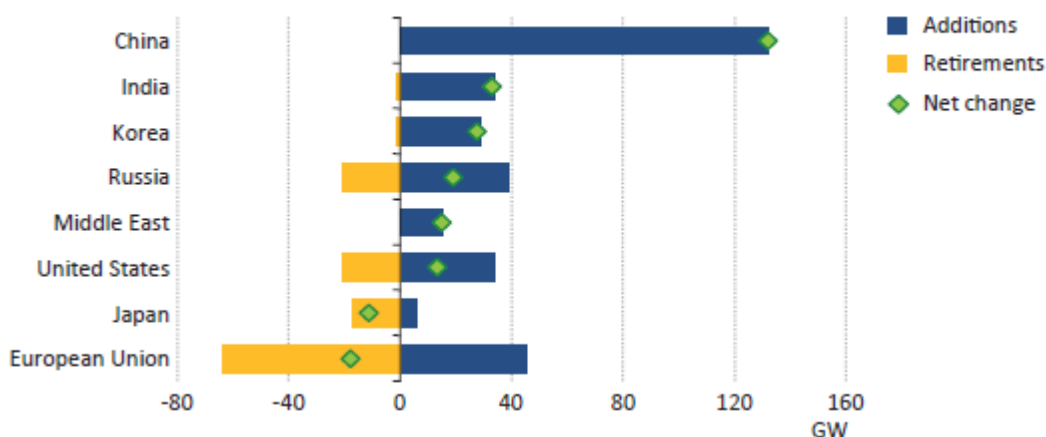
Les enjeux de la diffusion des technologies relevant de l'addition sont remarquablement hétérogènes. Le défi du nucléaire est de poursuivre sa diffusion malgré les résistances accrues dont il fait l'objet. Le captage du CO₂ ne constitue pas une nouvelle technique de production, mais a pour but d'optimiser les performances environnementales des systèmes de conversion thermiques en place en y adjoignant des dispositifs susceptibles d'en limiter les émissions. Les smart grids vont impacter l'évolution des réseaux à travers l'ajout de capteurs, de systèmes de communication et d'analyse afin d'améliorer la gestion de la demande.

La fission nucléaire est une technologie en place depuis quarante ans et devrait poursuivre son développement à l'échelle globale. L'AIE (2015a) estime que, dans un scénario où l'on parviendrait à maintenir l'augmentation de la température à +2°C, la fission nucléaire permettrait de limiter les émissions à hauteur de 55 Gt CO₂ d'ici 2050 (soit 17% du potentiel de réduction du secteur électrique), ce qui signifierait qu'elle augmente sa capacité de 396 GW (sa capacité installée en 2013) à 585 GW en 2050 (AIE 2015b). Initialement développée pour des applications militaires, l'énergie nucléaire est une énergie compétitive⁴⁶ qui permet de produire de l'électricité sans générer d'émissions de CO₂. Bien qu'elle tende en Europe à faire l'objet d'un processus de substitution technologique, il semble important d'y accorder une attention particulière. La raison réside dans un paradoxe. D'un côté, la catastrophe de Fukushima a exacerbé en Europe les controverses dont le nucléaire fait l'objet, au point que plusieurs pays européens ont choisi de restreindre, voire de totalement se désengager de cette énergie (le solde cumulé entre les mises en arrêt et les mises en service des centrales nucléaire devrait tomber en Europe à environ – 20 GW d'ici 2040). De l'autre, le premier parc mondial en termes de capacités installées se trouve aujourd'hui en Europe, en particulier en France et Electricité de France, l'actuel leader mondial du nucléaire, est une entreprise européenne.

⁴⁵ Chacun des domaines technologiques étudiés fera l'objet d'une étude de cas spécifique qui sera présentée dans le [Chapitre IV Etude de cas : Une approche par domaine technologique](#).

⁴⁶ Si le coût de production de l'électricité à partir du nucléaire est relativement plus faible que celui d'autres énergies primaires (cf. Figure 4 : [Coûts de production actualisés de l'électricité \(taux d'actualisation de 5%\) aux Etats-Unis](#)), la prise en compte des coûts de démantèlement pourraient changer cette donne.

Figure 18 : Evolution des capacités installées du nucléaire par région selon le New Policies Scenario 2014-2040



Source : AIE (2014a)

Le CCS relève d'une « nouvelle forme » d'addition technologique. Alors que, par le passé, l'addition technologique avait toujours relevé de l'introduction de nouveaux systèmes de conversion, le CCS vise à améliorer les performances environnementales des centrales (les émissions des centrales au charbon et au gaz pourraient être réduites de 85 à 95%) en capturant le dioxyde de carbone émis pendant la combustion de l'énergie fossile, puis consiste à le transporter et à l'injecter dans des formations géologiques ou océaniques telles que, par exemple, des champs de pétrole ou de gaz épuisés.

Dans un contexte où, à moyen terme, les énergies fossiles représenteront toujours une part significative du mix électrique mondial, et dans la mesure où les durées d'amortissement des centrales électriques sont particulièrement longues, le CCS jouera le rôle de technologie de transition en attendant le déploiement à grande échelle d'un système énergétique bas carbone. A l'échelle mondiale, l'AIE estime que pour limiter le réchauffement du climat à 2°C d'ici 2050 (scénario 2DS), le CCS devrait contribuer à réduire de 13% les émissions totales de CO₂ et de 18% les émissions du secteur électrique (AIE, 2015b). Cependant, au regard des réglementations en vigueur au moment de la publication du New Policies Scenario de l'AIE (AIE, 2015a), seulement 1% de l'électricité mondiale serait produite à partir de centrales pourvues de dispositifs de capture. A l'opposé, l'Europe devrait jouer un rôle moteur dans l'utilisation de cette nouvelle technologie. Le « EU Reference Scenario 2013 » (CE, 2013a) prévoit qu'au regard de la réglementation en vigueur au moment de la publication du rapport, la part de la production atteindrait, dès 2035, 1,7% de la production d'électricité pour représenter 7% en 2050. De plus, la Commission européenne (2011a) signale que, dans le cas où, d'ici 2050, les réductions du secteur électrique atteindraient 93 à 99% par rapport au niveau de 2007, la part du CCS pourrait alors représenter jusqu'à 32 % dans le secteur de la production d'électricité. Notons cependant qu'aujourd'hui le CCS est une technologie encore au stade expérimental et que des obstacles d'ordre socio-économique contrarient sa diffusion, notamment en raison des risques potentiels de fuite lors des opérations de transport et de stockage du carbone.

Les smart grids (« Réseaux intelligents ») permettent de répondre aux nouveaux besoins de flexibilité dans la gestion de la demande et devraient constituer, à ce titre, un des principaux leviers d'efficacité énergétique du secteur électrique. En permettant d'accélérer le déploiement des programmes d'efficacité énergétique, de réduire les pertes dues à la transmission, en optimisant les appels de charge qui conduit à des économies d'énergies, l'AIE (2011) estime que les smart grids permettraient de limiter les émissions de CO₂ entre 0,7 et 2,1 Gt par an d'ici 2050⁴⁷. Cette technologie d'addition est, pour partie, liée avec celle de substitution puisqu'elle favorise l'introduction des énergies renouvelables. L'enjeu des smart grids est de compléter les réseaux en y ajoutant des capteurs, des systèmes de télécommunication et des logiciels. Jusqu'à présent, l'équilibre du système électrique était obtenu en pilotant l'offre afin de l'adapter au niveau de la demande. Ce qui correspond à un « Etat du monde » où la production électrique était centralisée au sein de capacités dotées de puissances importantes et où les flux d'électricité et d'information étaient uni-directionnels, du lieu de production vers le lieu de consommation. Dans un contexte de transition énergétique, les réseaux, qui ont connu peu de transformations depuis un siècle (Bauknecht, 2012) sont appelés à se renforcer. Il devront devenir intelligents et communicants pour tenir compte de l'augmentation marquée de la production d'électricité d'origine renouvelable (intermittente et décentralisée), faciliter une meilleure maîtrise de la consommation électrique en assurant des flux d'électricité et d'information bi-directionnels (Farhangi, 2010), s'interconnecter dans le but de renforcer l'efficacité du marché européen de l'électricité⁴⁸, gagner en robustesse pour gérer les appels de charges et leurs variations dus à l'augmentation des usages. Ils mobilisent différents segments amont et aval de la chaîne du transport (gestion IT de la demande, gestion bas carbone des bâtiments, véhicule électrique ...) pour lesquels certaines technologies sont déjà matures (notamment les systèmes de communication utilisés dans le secteur des télécoms) alors que d'autres émergent juste (bornes de recharge).

Les énergies de substitution sont, pour l'essentiel, composées des énergies renouvelables et de l'hydrogène. Deux énergies très différentes qui n'ont pas un rôle de la même importance à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Les énergies renouvelables sont librement disponibles dans la nature, inépuisables et n'émettent pas de CO₂⁴⁹ lors de leur conversion en électricité. Elles représentent, à ce titre, le principal levier mobilisé à l'échelle internationale (et pourrait être à l'origine, selon l'AIE, 2015, de la réduction cumulée de 195 Gt CO₂ soit plus de 60% de la réduction des émissions du secteur électrique), et, plus spécifiquement en Europe, pour lutter contre le changement climatique. Le terme générique « énergies renouvelables » recouvre toute une gamme d'énergies (éolien, solaire, énergie des mers, ...) qui ne disposent ni des mêmes caractéristiques, ni du même potentiel de diffusion, ni de la même maturité. En 2013, hors hydraulique, les capacités renouvelables installées en Europe atteignaient 203 GW soit 21,1% des capacités totales (CE, 2015).

⁴⁷ En favorisant l'intégration des énergies renouvelables et la diffusion des véhicules électriques, les smart grids permettent aussi des réductions d'émissions indirectes.

⁴⁸ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

⁴⁹ A l'exception de la biomasse.

L'Europe a régulièrement fixé des objectifs pour encourager l'utilisation des énergies renouvelables. Dès 2007, l'Union européenne s'est engagée, à horizon 2020, à porter à 20 % la part d'énergies renouvelables dans la consommation finale énergétique. En 2014, dans le cadre du « Paquet Énergie-Climat pour 2030 », l'Europe aspire à monter cette part à 27 % de la consommation finale d'énergie européenne à horizon 2030. La Commission européenne (CE, 2013a) estime qu'au sein du secteur électrique, les énergies renouvelables devraient assurer 43% de la consommation finale d'électricité d'ici 2030 et 50% d'ici 2050. Les énergies renouvelables ont vocation à se substituer aux énergies fossiles (charbon et pétrole en particulier) dans le secteur électrique européen, ce qui devrait se traduire par des capacités installées éoliennes de l'ordre de 305 GW en 2030 et 413 GW en 2050, et, dans le secteur du photovoltaïque, par des capacités installées de 149 GW en 2030 et 231 GW en 2050.

Bien que l'hydrogène ne fasse pas partie des domaines technologiques les plus décisifs pour décarboner le secteur électrique⁵⁰, il est toutefois nécessaire de lui accorder une attention particulière au regard de son potentiel de stockage de l'électricité à grande échelle et de sa capacité à faciliter l'introduction des énergies renouvelables. A travers la technique de l'électrolyse de l'eau, l'électricité est en mesure de produire de l'hydrogène, l'élément naturel doté de la plus grande densité énergétique ; sous cette forme, l'électricité peut être plus facilement stockée en grande quantité. Puis, combiné à une pile à combustible, l'hydrogène peut être, à son tour, transformé en électricité. L'électricité produite après transformation en hydrogène peut être assimilée à une forme « d'énergie tertiaire » car elle subit deux transformations avant d'être mobilisée pour un usage final. Notons que dans *la feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050*, la Commission européenne (2011) mentionnait : « les piles à combustible et l'hydrogène, qui, en combinaison avec les réseaux intelligents, peuvent multiplier les retombées positives de l'électro-mobilité, tant pour la décarbonisation des transports que pour le développement des sources d'énergie renouvelables ». Dans la mesure où la production d'électricité à partir de sources renouvelables peut excéder la demande⁵¹ et que les énergies renouvelables sont, par nature, intermittentes, il est nécessaire d'envisager des systèmes de stockage de l'électricité. Mais il reste encore à surmonter de nombreux défis, tels que la production et le stockage d'hydrogène et la compétitivité des piles à combustible par rapport aux technologies actuellement utilisées.

⁵⁰ C'est dans le secteur des transports que le potentiel de décarbonisation de l'hydrogène est le plus important. Le déploiement des véhicules électriques utilisant l'hydrogène devrait permettre, selon AIE (2015e), de contribuer à 14% des réductions d'émissions du secteur des transports pour limiter l'augmentation de la température à 2°C.

⁵¹ L'injection de l'électricité renouvelable étant prioritaire sur le réseau, il est possible que la conjugaison de conditions d'offre, de demande et de météo produisent des situations où l'offre est supérieure à la demande conduisant à des prix négatifs de l'électricité. Ce fut, par exemple, le cas en France où entre le 14 et le 15 juin 2013, la France a connu des prix négatifs et en Allemagne dans la nuit du 24 au 25 décembre 2012.

3. CONCLUSION

Afin de contenir dans des proportions raisonnables le réchauffement climatique, la transition énergétique vers une économie sobre en carbone doit se dérouler dans un délai inférieur à un demi-siècle, soit une période exceptionnellement courte au regard du temps nécessaire aux précédentes transitions. Pour cela, la transition bas carbone nécessite, pour la première fois, que les Etats l'impulse, alors qu'historiquement, ils ont plutôt accompagné et encadré les transitions.

Par le passé, les transitions se sont traduites par l'addition successive de nouveaux couples « énergie primaire / système de conversion ». Bien que le progrès technique ait permis de constamment augmenter l'efficacité énergétique des centrales de production, les gains d'efficience n'ont jamais compensé l'augmentation des besoins énergétiques. Ainsi, malgré une coévolution entre l'offre et la demande, *il apparaît que, depuis le début de l'ère industrielle, c'est la demande qui a été à l'origine des évolutions technologiques.*

De par son potentiel de réduction des émissions, le secteur de l'électricité est appelé à jouer un rôle central dans la transition énergétique. Cependant, la transition du secteur électrique en Europe ne pourra s'inscrire dans les mécanismes observés au cours de l'histoire industrielle, ou qui pourraient fonctionner dans d'autres environnements, pour les raisons suivantes :

- La transition bas carbone ne devrait pas se dérouler dans un contexte d'augmentation de la demande et, ce, en dépit des nouveaux débouchés envisagés pour l'électricité (transport, chauffage, refroidissement...). Les mesures en faveur de l'augmentation de l'efficacité énergétique, et le contexte macro-économique, conduisent à ce que, pour la première fois de l'histoire, *les gains d'efficience compensent la croissance de la consommation.*
- La transition du secteur électrique ne sera pas subordonnée à la découverte d'une nouvelle énergie primaire ou à l'introduction d'un nouveau système de conversion en rupture. Pour la première fois, une variété de domaines technologiques devront simultanément⁵² être mobilisés et cela sur l'ensemble de la chaîne de valeurs : au niveau de la production, comme cela avait déjà été le cas ces deux derniers siècles, mais aussi au niveau de la transmission et de la distribution.
- Alors que par le passé les nouveaux besoins en énergie ont induit un processus d'addition technologique, la nécessité actuelle de réduction des émissions de CO₂ s'inscrira, en Europe, dans un double processus de substitution et d'addition technologique. Les énergies renouvelables ont vocation à se substituer au charbon et au pétrole dont la part devrait être quasi nulle à horizon 2050. L'addition technologique consistera, pour sa part, à améliorer les performances

⁵² L'introduction simultanée ne signifie pas que chaque domaine technologique sera déployé selon un rythme identique.

environnementales du système plutôt qu'à développer de nouveaux procédés de conversion.

De par son caractère systémique et ses singularités, la transition énergétique mise en œuvre diffère radicalement de celles observées au cours de l'ère industrielle. Elle annonce une modification structurelle du système électrique et augure de l'arrivée d'une nouvelle ère énergétique décarbonée. Pour que cette nouvelle ère puisse s'instaurer et pour assurer l'évolution du secteur électrique européen, la technologie est conduite à jouer un rôle beaucoup plus important que précédemment.

Parmi la variété de technologies bas carbone envisagées pour assurer la transition du secteur électrique, et au regard de leur potentiel de réduction d'émission en Europe et dans le monde, nous avons choisi de nous concentrer sur les cinq domaines suivants : le nucléaire, le CCS et les smart grids qui relèvent tous trois de l'addition technologique et les énergies renouvelables et l'hydrogène qui répondent à une logique de substitution technologique.

CHAPITRE II – LA TRANSITION ENERGETIQUE BAS CARBONE AU PRISME DE L'ANALYSE DES TRANSITIONS TECHNOLOGIQUES

La transition du secteur électrique nécessite une grande variété d'innovations environnementales en mesure de lutter contre le réchauffement du climat. L'objet du présent chapitre est d'identifier les facteurs spécifiques favorisant l'introduction de ces innovations.

Dans la section 1, nous analyserons les raisons pour lesquelles le processus d'introduction des innovations environnementales par les électriciens est plus complexe que celui dans lequel s'inscrit l'introduction de technologies « classiques ». Nous commencerons par documenter le processus de compétition généralement observé lors de l'introduction de technologies s'appuyant sur une nouvelle base de connaissance en mettant, notamment, l'accent sur le phénomène de dépendance au sentier. Pour surmonter ces blocages, nous mettrons en évidence le rôle des expérimentations au sein des niches de marché qui permettent des interactions entre producteurs et utilisateurs de technologie. Puis, nous examinerons les raisons pour lesquelles les blocages sont exacerbés dans le cas de l'introduction des innovations environnementales par les électriciens.

Dans la section 2, nous distinguerons deux leviers en mesure de favoriser l'introduction des technologies bas carbone par les électriciens. Tout d'abord, nous nous intéresserons aux modes d'intervention des autorités publiques. Nous commencerons par analyser d'un point de vue théorique les instruments économiques permettant d'internaliser les externalités. Nous distinguerons, pour cela, les mesures demand pull, des mesures technology push. Puis, nous nous intéresserons aux collaborations, facteur qui a régulièrement été mis en évidence par la littérature pour favoriser l'introduction des innovations environnementales.

1. LE SECTEUR ELECTRIQUE FACE A LA NECESSITE D'UN CHANGEMENT D'ARCHITECTURE DOMINANTE

1.1 FONDEMENTS THEORIQUES DE LA COMPETITION TECHNOLOGIQUE

La compétition technologique renvoie à une situation où une technologie appuyée sur des nouvelles connaissances entre en concurrence avec une technologie déjà établie, mécanisme à l'œuvre dans toute transition technologique, et, de facto, dans le cas présent de la transition vers les technologies bas carbone.

Le concept d'architecture dominante éclaire la manière dont les nouvelles technologies entrent en compétition avec les technologies établies. Abernathy et Utterback (1975) constatent qu'un cadre de référence existe au sein de chaque industrie et sert de socle pour le développement de nouvelles techniques. Une théorie qu'Utterback développera ensuite : "A dominant design in a product class is, by definition, the one that wins the allegiance of the marketplace, the one that competitors and innovators must adhere to if they hope to command significant market following. The dominant design usually takes the form of a new product (or set of features) synthesized from individual technological innovations introduced independently in prior product variants" (Utterback, 1994). L'architecture dominante est donc caractérisée par l'émergence d'un standard et l'homogénéisation des offres technologiques.

La mise en place de l'architecture dominante est le fruit d'un processus évolutionniste qui voit se succéder un mécanisme générateur de diversité, un mécanisme de sélection et enfin un mécanisme de réplication. Avant que le standard ne soit établi, les acteurs se font concurrence en créant de la diversité pour soumettre au marché une variété de configurations dont les caractéristiques et les propositions de valeur sont hétérogènes. Les différentes configurations sont toutes exposées à un « risque technologique » et à un « risque de marché » ; leur succès reste, à ce stade, incertain. Puis se met en place le mécanisme de sélection, induit par les préférences des consommateurs, qui contribue à limiter la diversité de l'offre en évinçant les produits aux propositions de valeur les moins satisfaisantes. Enfin, le mécanisme de réplication voit le modèle sélectionné par le marché être dupliqué avec des variations limitées autour du standard retenu.

L'architecture dominante conduit à la constitution d'un paradigme technologique (Dosi, 1982) dans lequel s'inscrivent différents acteurs. Dosi (1982) définit ce paradigme comme « un modèle de solutions de problèmes technico-économiques, et des règles spécifiques conçues pour acquérir de nouvelles connaissances » qui représente dès lors le socle de référence pour les imitateurs qui amélioreront les produits en dupliquant la technologie sans pour autant encourir l'intégralité des risques initiaux (de marché et technologiques) pris par les entrepreneurs-innovateurs (au sens de Schumpeter, 1939). Se met dès lors en place une dépendance au sentier: les efforts d'innovation seront principalement concentrés autour des standards déjà adoptés par le marché. Un mécanisme qui contribue parallèlement à bloquer le

déploiement de technologies fondées sur un nouveau socle technologique et de nouvelles connaissances (Unruh, 2000).

Autant de concepts qui nous permettent d'identifier les différentes difficultés auxquelles seront confrontées les technologies bas carbone :

- Les technologies établies ont bénéficié d'effets d'apprentissages qui, en contribuant à leur diffusion, ont généré des économies d'échelles. Les rendements ont cru conjointement à leur déploiement de plus en plus large, mécanisme qui incite les entreprises à se concentrer sur l'amélioration de leurs performances, ce qui tend à figer l'émergence de nouvelles options.
- Le paradigme technologique crée un effet d'agglomération, en entretenant les technologies entre elles. Une interconnexion porteuse d'une culture institutionnelle rigide et de comportements routiniers qui concourent à exclure les technologies les plus éloignées du cadre établi. L'imagination des ingénieurs et les efforts de leurs organisations convergent alors vers une direction précise, devenant, par là-même, sourds aux options technologiques divergentes, et, dans le même temps, les utilisateurs se voient dépourvus de toute incitation à tester de nouvelles alternatives. L'innovation poursuivie par les acteurs est, dès lors, prioritairement associée au cadre établi et se poursuit selon un processus incrémental.
- Le mécanisme identifié par Gilfillan (1935), dans le cadre de l'étude éponyme sur l'évolution des techniques utilisées pour la propulsion des navires, sous le terme de "sailing ship effect" (effet du bateau à voile). Ses travaux mettent en lumière l'amélioration des performances des technologies établies concomitante à l'émergence d'une innovation destinée à fournir un type d'activités et de services similaires, tendance que l'on observe fréquemment, et quel que soit le domaine d'activité. Cooper et Schendel (1976) ont, par exemple, étudié sept différents cas de concurrence entre une technologie ancienne et une nouvelle - depuis les moteurs de locomotives jusqu'aux tubes aspirants - et relèvent que, pour chacun d'entre eux, on observe ce mécanisme à l'œuvre. Lequel serait, selon leurs conclusions, pour l'essentiel dû au redoublement des efforts tendus vers l'amélioration de l'ancienne technologie, du fait de la menace inhérente à l'introduction de la nouvelle.

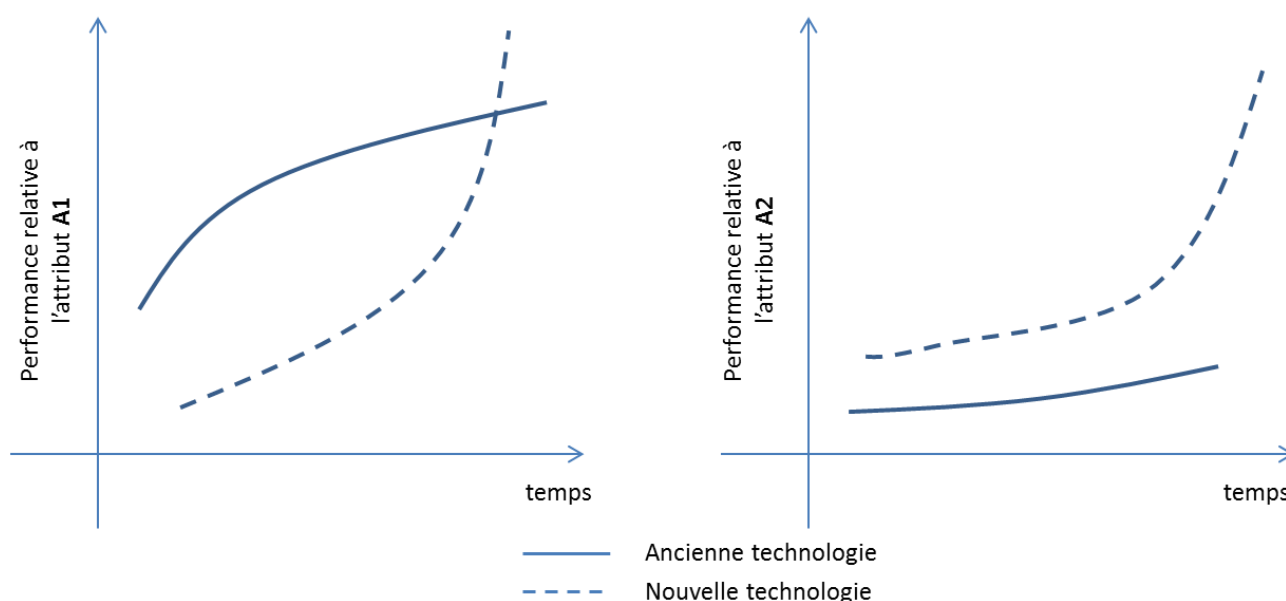
Dans la mesure où les « nouvelles » technologies introduites à l'état brut sont en général imparfaites et chères (Rosenberg, 1994), les niches de marché représentent un cadre particulièrement adapté pour renforcer le processus de R&D, en offrant une forme de protection contre les pressions concurrentielles (Kemp et Arundel, 1998), le temps de conduire les expérimentations nécessaires. Cette étape vise à stabiliser la technologie en accroissant ses performances afin de renforcer son potentiel de commercialisation.

Caractérisée par son faible nombre de producteurs et d'utilisateurs (Malerba et al, 2007) qui interagissent pour tester, modifier et améliorer une technologie, une niche se singularise également par le profil de ses consommateurs, définis comme « un groupe d'utilisateurs prêts

à payer une prime significative pour des caractéristiques alternatives » (Faber et Frenkel 2008). Grâce à ces derniers, la nouvelle technologie bénéficiera des effets d'apprentissage nécessaires à sa pérennisation. Fouquet (2011) signale en outre « qu'au sein d'une niche, les utilisateurs sont en général moins sensibles au prix et plus enclins à payer pour le service ». Clients aux préférences hétérogènes par rapport à celles du marché de masse, ils constituent, par là-même, une cible privilégiée pour tester l'appétence de ce dernier pour les caractéristiques spécifiques de la technologie en question. L'impact des préférences hétérogènes sur la transition technologique a été étudiée par plusieurs chercheurs (Janssen et Jager, 2002 ; Malerba et al., 2007), qui confirment que les niches constituées par des groupes d'utilisateurs aux préférences « alternatives » sont déterminantes pour le succès d'une transition technologique. Dès lors qu'elle se positionne dans cet espace protégé, la nouvelle technologie peut amorcer sa maturation et renforcer son efficacité afin de se préparer à faire face à la concurrence des technologies dominantes.

Les travaux de Christensen (1997) ont contribué à une meilleure compréhension des mécanismes de transition technologique et du rôle joué par la demande, en développant notamment le concept d'« innovations disruptives », soit des innovations porteuses de performances radicalement différentes de celles disponibles sur le marché. Au moment de leur introduction, les innovations disruptives disposent de performances en retrait de celles des technologies établies sur les dimensions qui sont les plus importantes pour les consommateurs, mais de performances supérieures sur des attributs considérés comme secondaires. Pour expliquer pourquoi les consommateurs traditionnels adoptent une technologie disruptive en dépit de la supériorité de la technologie en place, Christensen s'appuie sur la notion d'« offre excédentaire de performance ». Une fois les exigences des consommateurs pour un attribut fonctionnel particulier remplies, la priorité concerne alors les attributs initialement considérés comme secondaires. Ce que Christensen appelle la « translation des préférences des consommateurs », et qui explique en partie le succès des innovations fondées sur de nouvelles connaissances.

Figure 19: Modèle de substitution technologique de Christensen



Source : auteur, à partir de Christensen (1997)

Afin de surmonter les blocages identifiés dans la section précédente⁵³ (rendements croissants, concentration des travaux des ingénieurs sur les technologies établies, interconnexion des technologies entre elles), les interactions entre les producteurs et les utilisateurs de technologie sont nécessaires ; le cadre proposé par les niches jouera ici un rôle décisif, en permettant de bénéficier des effets d'apprentissage, de baisser les coûts, et de limiter ainsi les risques de marché et les risques technologiques.

1.2 LES CONTRAINTES SPECIFIQUES A L'INTRODUCTION DES TECHNOLOGIES BAS CARBONE DANS LE SECTEUR ELECTRIQUE

Le phénomène de blocage des technologies énergétiques au sein d'une architecture dominante a été documenté par les travaux de Grubler (2012). En analysant les deux dernières transitions énergétiques (de la biomasse vers le charbon et du charbon vers les énergies « modernes »), au sein de huit pays européens (l'Allemagne, l'Espagne, la France, l'Italie, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume Uni, et la Suède), Grubler souligne les durées significativement différentes de chaque pays en matière de transition énergétique, caractéristiques de ce blocage. Il dresse un tableau du temps (Δt) nécessaire pour passer des énergies pré-industrielles au charbon et ensuite du charbon vers les énergies modernes (pétrole, gaz et électricité), fondé sur les théories de la diffusion spatiale. On constate que les pays européens se répartissent en trois catégories, en fonction de leur durée de transition respective : les précurseurs (« core »), les suiveurs (« rim ») et les adopteurs tardifs (« periphery »).

⁵³ Cf. Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

Figure 20: Dynamique des transitions énergétiques en Europe

		Diffusion midpoint T_0	Diffusion speed Δt
<i>Phase-out trad. renewables phase-in coal:</i>			
Core	England	1736	160
Rim	Germany	1857	102
	France	1870	107
	Netherlands	1873	105
Periphery	Spain	1919	111
	Sweden	1922	96
	Italy	1919	98
	Portugal	1949	135
<i>Phase-out coal phase-in oil/gas/electricity:</i>			
Core	Portugal	1966	47
	Italy	1960	65
	Sweden	1963	67
Rim	Spain	1975	69
	Netherlands	1962	62
	France	1972	65
Periphery	Germany	1984	50
	England	1979	67

Source : Grubler (2012)

Grubler met ici en évidence la lenteur à laquelle s'opèrent les transitions énergétiques, de l'ordre d'un siècle pour passer de la biomasse au charbon et de soixante ans pour la transition du charbon vers les énergies modernes. Il souligne, en outre, un double mécanisme dit de « premier entré dernier sorti » et de « dernier entré premier sorti », symptomatique du phénomène de blocage. Les pays « suiveurs » de la première transition énergétique (Portugal, Italie, Suède) effectuent la transition vers les énergies fossiles en position de précurseurs, alors que les précurseurs de la transition de la biomasse vers le charbon (Angleterre, Allemagne, France) réalisent celle vers le pétrole, le gaz, et l'électricité en position d'adopteurs tardifs.

Lors de la transition vers les énergies nouvelles, les « suiveurs » peuvent bénéficier des externalités d'apprentissage offertes par l'expérience des pionniers : les nouvelles technologies de production ont eu le temps de se stabiliser, et leur coût de chuter, d'où une transition facilitée et donc plus rapide pour les suiveurs. A l'opposé, les précurseurs sont captifs de leur succès passé : « après avoir réussi l'initiation et l'implémentation d'une première transition énergétique, les pionniers font face à de formidables défis pour transformer une nouvelle fois leur système énergétique » (Grubler, 2012 p6). Les pays pionniers sont donc victimes des mêmes blocages qui les ont contraints à réaliser la transition technologique de la biomasse vers les énergies fossiles dans des délais plus longs que ceux qui ont adopté plus tardivement le nouveau système énergétique.

Aujourd'hui, le secteur de l'électricité européen évolue au sein d'une architecture dominée par les technologies thermiques. En 2013, malgré les différences de technologies

(hydraulique, éolienne, ...) qui participent à la production d'électricité, celle-ci est assurée en Europe à hauteur de 62,3% (AIE, 2015a) par des technologies thermiques (et à hauteur de 50,3% par des technologies thermiques s'appuyant sur la combustion d'énergies fossiles). A l'exception notable de la France dont la production électrique est principalement assurée par le nucléaire, les capacités thermiques représentent la première puissance installée pour 27 des 28 pays européens, et les énergies fossiles contribuent à hauteur de 53,3% à la production totale d'électricité. Ce qui signifie en corollaire, que parmi les dizaines de sociétés de production d'électricité installées sur le continent européen, le savoir-faire, les compétences et les travaux des dizaines de milliers d'ingénieurs et de chercheurs sont principalement concentrés sur les procédés thermiques et la maîtrise des énergies fossiles.

Stabilisées depuis plusieurs dizaines d'années, ces technologies ont pu bénéficier d'économies d'échelle en mesure de faire chuter leurs coûts de production. En outre, l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur sont associés au paradigme thermique. Les fournisseurs d'infrastructures de production d'électricité ont concentré leur offre autour des technologies thermiques et disposent de connaissances approfondies dans ces domaines, et les infrastructures de transmission et de distribution ont été construites en fonction des puissances, du niveau de la production et du caractère centralisé des centrales de production thermiques. Cette inter-dépendance entre les différents acteurs, associée aux rendements d'échelle croissants concourent à conforter naturellement la poursuite de trajectoires thermiques selon un processus incrémental et donc à bloquer l'introduction des technologies bas carbone.

Compte tenu de la structure du secteur électrique européen et des mécanismes de compétition technologique, la transition énergétique à venir constituera un processus particulièrement complexe et sensiblement différent des transitions du passé. Une complexité sans équivalent historique qui se double de difficultés spécifiquement liées aux technologies bas carbone.

Tout d'abord, les technologies bas carbone retenues ici⁵⁴ ne s'inscrivent pas, pour la plupart, dans l'architecture dominante ; elles ne s'appuient pas sur la combustion d'énergies fossiles et ne constituent pas une amélioration de procédés éprouvés. Elles se différencient, en outre, par la mobilisation de technologies de télécommunication et de traitement des données, la conversion de l'énergie mécanique d'origine renouvelable en électricité, et appellent à gérer des capacités décentralisées alors que les installations étaient jusqu'à présent centralisées. Les technologies bas carbone se fondent donc sur des connaissances nouvelles, qui diffèrent sensiblement de celles accumulées. Alors que les électriciens sont naturellement enclins à innover en améliorant les procédés thermiques, l'introduction des technologies bas carbone suppose de transformer l'architecture dominante.

Deuxièmement, les technologies bas carbone ne répondent pas à un nouveau besoin des utilisateurs⁵⁵ : la consommation d'électricité devrait rester stable en Europe dans les quarante prochaines années (CE, 2013a). Par ailleurs, l'électricité étant un bien non différencié, les

⁵⁴ Cf Chapitre I, section [2.2.2 Focus sur cinq domaines technologiques bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique](#).

⁵⁵ Cf Chapitre I, section [2.2.1 Vers une nouvelle dynamique de diffusion des technologies énergétiques](#).

technologies bas carbone n'apportent pour la plupart, aucune valeur supplémentaire⁵⁶ aux consommateurs et ne constituent pas en l'espèce un moyen de bénéficier d'avantages compétitifs.

En revanche, en décorrélant les émissions CO₂ de la production d'électricité, ces technologies contribuent à la lutte contre le réchauffement climatique et proposent, de ce fait, des externalités positives à la collectivité. Ces externalités sont de deux ordres : à l'instar des innovations classiques, les technologies bas carbone offrent des externalités de connaissance, mais elles offrent également des externalités environnementales, qui leurs sont propres et rendent leur introduction d'autant plus souhaitable. Nous nous trouvons donc dans un cadre inédit où l'adoption de ces technologies bas carbone par les électriciens et la mise en place d'une nouvelle architecture bas carbone est indispensable pour la collectivité alors même qu'elles ne génèrent pas d'avantages stratégiques pour les électriciens. Autant d'éléments qui dissuadent les électriciens de prendre un risque technologique et un risque de marché pour leur introduction.

Enfin, les innovations bas carbone nécessaires à la lutte contre le réchauffement climatique sont, avant tout, des innovations environnementales, qui se distinguent des innovations classiques par leur caractère plus systémique (Theyel, 2006; Müller et Seuring, 2008) dans la mesure où une variété de segments et d'acteurs sont impactés par leur introduction. Les interactions ne peuvent dès lors plus se limiter à associer, dans le cadre des niches de marché, producteurs et utilisateurs, mais nécessitent une coordination de l'ensemble des parties prenantes du secteur.

⁵⁶ A l'exception du véhicule électrique et des compteurs intelligents.

2. LES LEVIERS FAVORISANT L'INTRODUCTION DES TECHNOLOGIES BAS CARBONE PAR LES ELECTRICIENS

Comme vu précédemment, la transition énergétique du secteur électrique est étroitement liée à la capacité des électriciens à acquérir de nouvelles connaissances et à coordonner les parties prenantes du secteur pour bâtir une architecture sobre en carbone. Pour répondre à ces enjeux, deux leviers sont susceptibles d'être activés, l'un de nature « exogène » (via l'intervention des autorités publiques) l'autre « endogène » (via des collaborations entre acteurs industriels).

2.1 L'INTERVENTION DES AUTORITES PUBLIQUES

Les technologies bas carbone sont caractérisées par deux externalités positives – une externalité de connaissance et une externalité environnementale - qui rendent leur diffusion d'autant plus souhaitable pour la collectivité et, ce, dans des délais particulièrement serrés par rapport aux précédentes transitions énergétiques. Cependant, leur déploiement est confronté à un échec de marché et, plus globalement, à un échec de système. Afin de pallier ces défaillances, des politiques environnementales et des politiques en faveur de l'innovation sont mises en œuvre au niveau national, européen et international. L'intervention publique, à travers les signaux prix qu'elle instaure, constitue un levier essentiel pour infléchir le comportement des électriciens dans le sens de l'introduction et de la diffusion des technologies bas carbone. Mais la question des mesures à privilégier, environnementales ou en faveur de l'innovation, continue de faire débat. Différentes réglementations, et une large variété d'instruments économiques, sont d'ores et déjà mobilisées et déclinés sous forme de mesures « market pull » et « technology push ». Si certains semblent plus à même de répondre aux enjeux spécifiques de cette transition singulière, la plupart des économistes s'accordent à penser que sa réussite nécessite, de fait, une complémentarité des différentes mesures.

L'introduction des nouvelles technologies environnementales conduit à deux externalités positives : celle liée à la connaissance et celle liée à l'environnement (Jaffe et al., 2002). Tout d'abord, l'innovation offre une externalité de connaissance. L'innovation est un bien public (Arrow, 1962) qui répond aux critères de « non-rivalité » et de « non-exclusivité ». Le principe de « non-rivalité » s'applique dès lors que le coût lié à la fourniture d'une unité supplémentaire d'un bien ou d'un service est proche de zéro et que l'usage d'une technologie par une entreprise n'en diminue pas la valeur pour une autre. Le principe de « non-exclusivité » concerne les situations où il est impossible, ou très coûteux, d'écarter des acteurs de l'usage d'un bien ou d'un service. Parce que la valeur totale du savoir technologique suit le principe de non exclusion, les inventeurs ne peuvent s'approprier la totalité de la valeur générée par les savoirs qu'ils ont contribué à créer ; en d'autres termes, les rendements privés issus d'une innovation sont généralement inférieurs aux rendements sociaux, estimés deux à trois fois supérieurs (Mansfield, 1996). Néanmoins, sans intervention des pouvoirs publics, les entreprises auraient tendance à sous-investir dans la R&D par rapport au niveau

nécessaire pour assurer l'optimum social. Cette externalité n'est pas spécifique aux innovations environnementales mais concerne l'ensemble des innovations.

La seconde externalité, propre quant à elle aux technologies bas carbone, est de nature environnementale. Parce qu'il permet de diminuer les émissions de CO₂, le déploiement des innovations environnementales dans le secteur électrique est fortement souhaitable d'un point de vue collectif, mais se heurte à deux écueils. D'une part, les innovations environnementales sont moins matures et donc plus chères que les technologies déjà établies, ce qui constitue un premier frein. Et par ailleurs, les émissions de CO₂ rejetées dans l'atmosphère qui constituent des externalités négatives pour l'environnement ne sont pas prises en compte dans le coût de production des électriciens. Par conséquent, sans internalisation du coût des externalités négatives, le prix de marché des énergies fossiles est en-deçà de son coût social réel.

Dans un contexte où ni la valeur du bénéfice social des innovations environnementales, ni les coûts des externalités ne seraient internalisés, il n'existerait aucune incitation économique pour qu'un acteur privé diverge de sa trajectoire thermique pour adopter des innovations bas carbone. Sans cadre réglementaire adapté, nous serions alors en présence d'un « échec de marché ».

Les échecs de marché et de système justifient la mise en œuvre de réglementations. La sélection des mesures qui peuvent stimuler l'innovation ou contraindre les émissions de CO₂ s'inscrivent dans un débat qui voit se confronter deux approches quant au type de politiques publiques à adopter :

- Les politiques environnementales, qui visent à réguler les externalités environnementales. Pour cela, elles s'appuient sur des instruments économiques qui vont augmenter le coût de production de l'électricité produit à partir d'énergie fossile afin de le rapprocher de son vrai coût social.
- Les politiques en faveur de l'innovation, qui consistent quant à elles, à stimuler l'émergence de nouvelles technologies moins émettrices de CO₂ en les rendant plus attractives d'un point de vue économique. Elles permettent ainsi de contourner la situation de blocage générée par les technologies thermiques.

Si les politiques environnementales et celles en faveur de l'innovation suivent des logiques différentes, la proposition selon laquelle une politique d'innovation éclairée pourrait se substituer à la régulation environnementale a souvent été formulée. L'administration Bush a, par exemple, utilisé cet argument pour justifier la non-ratification du Protocole de Kyoto par les Etats-Unis. D'autres acteurs ayant soutenu d'ambitieux programmes de subventions en matière d'énergies renouvelables, tels ceux développés en Allemagne, ont exprimé des points de vue similaires. Des études montrent qu'il est peu probable que, dans les prochaines décennies, la réduction des émissions soit principalement due à la réglementation en faveur de l'innovation. Selon Popp (2002), les diminutions des GES seraient davantage causées par une régulation environnementale susceptible de modifier les décisions relatives aux entrées-sorties

au niveau des producteurs et des consommateurs, avec pour conséquence la reconfiguration du secteur et de la structure de la demande économique.

Porter et Van der Linde (1995) ont remis en cause les théories classiques de l'économie selon lesquelles une réglementation environnementale, en faisant peser des contraintes supplémentaires sur les entreprises, augmenterait les coûts de production et affecterait négativement leur position concurrentielle sur les marchés internationaux. Selon la désormais célèbre « hypothèse de Porter », la régulation environnementale peut améliorer la compétitivité d'un pays, voire créer un avantage concurrentiel pour ses précurseurs, de par son effet incitatif sur l'innovation environnementale. En effet, si la régulation conduit à des charges additionnelles pour les entreprises, les revenus générés par l'usage et la diffusion des innovations bas carbone seraient à même de dépasser ces coûts. Cette hypothèse a, depuis, été contestée par plusieurs chercheurs auteurs d'études empiriques relatives à la question (Ambec et al., 2011).

Nombre d'économistes s'accordent à considérer que lutter efficacement, et à moindre coût, contre le réchauffement climatique dans le cadre du secteur électrique, requiert de mobiliser une combinaison de politiques environnementales et de politiques de soutien à l'innovation. Par exemple, si les subventions allouées aux énergies renouvelables ne s'accompagnaient pas de politiques de réglementation environnementale, elles se borneraient exclusivement à diminuer le coût de l'énergie. Par répercussion sur les prix des énergies fossiles, ces mesures pourraient provoquer l'accélération de l'extraction des ressources en pétrole, gaz et charbon et involontairement une augmentation des émissions de CO₂, soit un phénomène de « paradoxe vert », mis en évidence par Van der Ploeg, (2011). Réciproquement, une réglementation environnementale menée seule pourrait conduire à un « biais sélectif » : le principal facteur de sélection deviendrait alors le niveau du coût marginal, et les technologies disposant du meilleur rapport coût/efficacité seraient mécaniquement favorisées par rapport aux technologies les moins matures, avec pour conséquence une sous-évaluation des effets d'apprentissage et des alternatives technologiques souhaitables à long terme.

Les politiques environnementales et celles en faveur de l'innovation se déclinent en mesures dites « technology push » et « market pull ». Les mesures « technology push » sont des incitations qui ont pour but de stimuler l'offre technologique, le plus souvent sous forme de subventions. Fléchées vers la phase amont du cycle de l'innovation, elles tendent à encourager les externalités positives liées à la connaissance. Inversement, les mesures dites « market pull » ont vocation à soutenir la diffusion des technologies bas carbone, en stimulant la demande des technologies dont le stade de maturité est le plus avancé.

La « technology push » consiste à mettre l'accent sur le développement de technologies bas carbone grâce à des programmes de R&D financés par les pouvoirs publics plutôt qu'au travers d'une limitation des émissions ad hoc. Les promoteurs de cette approche estiment que, compte tenu du fait que le réchauffement climatique dépend de l'accumulation sur le long terme des GES dans l'atmosphère, il est préférable de concentrer les investissements de court terme dans l'innovation technologique. Il est également proposé, dans ce cadre, d'adopter des limitations aux émissions uniquement dans un second temps, lorsque l'innovation aura permis

d'abaisser les coûts qui lui sont liés, plutôt que de réduire, dès à présent, les émissions par voie réglementaire, et ce de façon onéreuse (Wigley, et al. 1996). L'article de Hoffert et al. (2002) est devenu le point d'orgue de cette vision : parti du constat que les technologies aptes à résoudre le problème du changement climatique n'existent pas encore, il en conclut qu'il faut prioritairement encourager la mise en place d'un vaste programme technologique incluant de nouvelles sources d'énergie nucléaire et spatiale. Les mesures « technology push » sont avant tout destinées à favoriser la création de nouvelles connaissances sur les technologies les moins matures et limiter ainsi le risque technologique. En prenant la forme de programmes de recherche collaboratifs (comme par exemple, les Programmes Cadres de Recherche et Développement mis en œuvre à l'échelle européenne ou les Investissements d'Avenir lancés par la France), ces mesures incitent les acteurs à se coordonner et à travailler ensemble.

La vision opposée considère que la diffusion technologique est tirée par la demande (« market pull ») et que le changement technologique émane du secteur privé. Les partisans de cette approche estiment que les entreprises ne bénéficient pas d'incitations adaptées pour investir dans la recherche fondamentale : les rendements commerciaux en demeurent incertains et seulement envisageables à long terme. Dans le contexte de la lutte contre les dérèglements climatiques, ces incitations devraient être centrées sur les technologies dont le rendement social est élevé et ont atteint un certain stade de maturité sans pour autant être encore compétitives. Le principe consiste donc à augmenter la demande (à travers, par exemple, des primes à l'adoption) pour les technologies bas carbone et stimuler la compétition entre innovateurs pour la capter. Ce qui aurait pour effet d'accélérer leur diffusion tout en favorisant les effets d'apprentissage et d'accroître leur rentabilité tout en limitant les risques de marché.

Les visions divergentes quant au processus de changement technologique à adopter pour combattre le réchauffement climatique conduisent à des choix différents en termes de politiques publiques. Les principales différences entre les mesures « technology push » et « demand pull » sont synthétisées dans la figure 21.

Figure 21: Comparaison des approches « technology push » et « market pull »

	Technologie en « mode push » changement technique tiré par la R&D	Technologie en « mode pull » : changement technique tiré par le marché
Processus	Le changement technique dépend essentiellement de tendances indépendantes et de la R&D financée par des fonds publics	Le changement technique dépend essentiellement d'investissements réalisés par les entreprises (en R&D, apprentissage par l'expérience) en réponse à des conditions de marché
Implications économiques/ politiques		
<i>Implications économiques d'enjeux à grande échelle (par exemple, le changement climatique)</i>	La stabilisation atmosphérique est potentiellement très coûteuse sauf importantes percées en R&D	La stabilisation atmosphérique peut se faire à moindre coût au fur et à mesure que les innovations incrémentales s'accumulent
<i>Instruments politiques et distribution des coûts</i>	Instruments efficaces constitués par la R&D publique, à compléter si besoin par des prix d'externalités introduits par étape (par exemple, la taxe Pigouvienne)	Une réponse efficace pourrait supposer une action plus importante dès le départ, y compris un plafonnement des émissions/prix, une grande variété d'instruments ciblés vers une R&D industrielle réorientée, accélération de l'innovation dans des secteurs pertinents. Divers coûts marginaux possibles.
<i>Implications en termes de calendrier</i>	Report des abattements dans l'attente de la baisse des coûts de la technologie	Accélérer les abattements pour entraîner des réductions de coûts de la technologie
<i>Economie du « pionnier » en matière du contrôle des émissions</i>	Coûts assortis de faibles bénéfices	Investissements de départ avec une perspective de bénéfices importants
<i>Nature des retombées au plan international/Effets de fuite provenant de contraintes en matière d'émissions dans les principaux pays leaders</i>	Effets et retombées négatifs (effets de fuite positifs) en raison d'effets de substitution dans les pays non participants	Domination possible des retombées positives (effets de fuite négatifs dans la durée) en raison d'une diffusion internationale de technologies plus propres

Source : Grubb, Koehler et Anderson (2002)

Parmi les différentes mesures « technology push » et « market pull » mises en place par la Commission européenne pour favoriser l'introduction des technologies bas carbone⁵⁷, le marché européen des quotas (EU ETS) et le plan SET concernent directement les électriciens. Au cœur de la stratégie climat, ils sont mobilisés depuis quelques années par la Commission et

⁵⁷ Notons que les tarifs de rachat sont des mesures « demand pull » qui ont joué un rôle central pour la diffusion des énergies renouvelables, en particulier pour l'éolien et le photovoltaïque. En revanche, ce sont des instruments qui ont été implémentés au niveau national, ce qui signifie que l'ensemble des électriciens européens n'a pas été incité à travers le même signal-prix.

l'on peut, d'ores et déjà, dresser un premier bilan de leur implémentation, à titre d'illustration de la portée de ces différents outils.

En 2005, l'Union européenne a mis en place le premier marché des quotas, conçu comme l'outil central de sa politique climatique. La Commission européenne a plafonné les émissions de CO₂ des grandes installations industrielles, du secteur de l'électricité et du secteur de l'aviation. Il s'applique, donc, à environ 12 000 installations, lesquelles sont à l'origine de 50 % des émissions totales des GES de l'UE. 1453 centrales électriques et de cogénération, qui représentent 420 GW sur les 821 GW installées en Europe, participent depuis lors au système européen de quotas d'émissions de CO₂, composées principalement de centrales électriques fonctionnant au gaz naturel (46 %) et de centrales utilisant la combustion de charbon ou de pétrole (respectivement 24 % et 17 % des sites de production électrique de l'EU ETS).

Le prix de marché du CO₂ doit permettre de réaliser les objectifs climatiques selon le meilleur rapport coût-efficacité. Son fonctionnement est le suivant : l'organisme de régulation détermine le nombre total de quotas⁵⁸ disponibles sur le marché en fonction de la trajectoire environnementale établie⁵⁹. Les participants au marché reçoivent, en début de période, un nombre déterminé de quotas⁶⁰ qui contraindront leurs émissions. Les entreprises qui émettent en excès peuvent acheter des quotas auprès d'entreprises qui auront contenu les leurs. L'efficacité environnementale est atteinte parallèlement à l'efficacité économique : une seule information, le prix du carbone, s'intègre au processus décisionnel d'investissement et de gestion. A travers ce signal-prix, l'objectif des pouvoirs publics est d'encourager les électriciens à modifier leurs trajectoires d'émissions en adoptant des innovations bas carbone.

Le marché a été séquencé en trois phases (2005-2007, 2008-2012 et 2013-2020) en fonction desquelles le niveau des quotas alloué et les règles d'allocation diffèrent. Lors de la première phase, le prix du carbone évoluait entre 15 et 35 euros la tonne et aurait contribué à réduire les émissions à hauteur de 50 Mt CO₂ par an (Buchner et Ellerman, 2007). Durant la deuxième phase, la Commission européenne signale une diminution des émissions de l'ordre de 6,5% par rapport aux niveaux enregistrés en 2005. Cependant, le marché du carbone connaît alors des dysfonctionnements significatifs, si bien que le prix du carbone, oscillant autour de 5 euros la tonne au cours de l'année 2013, a cessé de représenter un signal prix suffisamment incitatif pour orienter les investisseurs vers des technologies sobres en carbone. De Perthuis et Trotignon (2013) voient trois facteurs à l'origine de cette situation : la crise économique rencontrée depuis 2008-2009 qui a réduit l'activité des entreprises, entraînant mécaniquement la baisse des émissions, et donc un excédent cumulé de quotas de l'ordre de 2,1 milliards en 2013 selon la Commission européenne ; l'entrée massive de crédits internationaux « Kyoto », dont le système européen des quotas est devenu l'acheteur unique ; et, enfin la superposition de l'instrument EU ETS avec d'autres politiques communautaires, telles que les directives sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

⁵⁸ 1 quota de CO₂ représente 1 tonne de CO₂.

⁵⁹ Cette trajectoire tient compte des émissions passées et des objectifs futurs d'émission.

⁶⁰ Entre 2005 et 2012, les quotas furent, soit alloués gratuitement aux entreprises, soit alloués selon un processus d'enchères et, cela, en fonction des secteurs d'activité. Depuis 2013, le processus d'enchères concerne l'ensemble des secteurs.

En ce qui concerne le secteur de l'électricité, Alberola et Berghmans (2013) font état d'une baisse de 186 Mt des émissions de CO₂, soit - 14,2 % entre 2007 et 2012, qui ont chuté de 1 306 Mt CO₂ en 2007, dernière année de la phase 1 à 1 120 Mt CO₂ en 2012. Les auteurs soulignent que ce sont les centrales à gaz et à pétrole qui ont vu leurs émissions de CO₂ se replier le plus fortement, de respectivement - 34 % et - 30 % entre 2008 et 2012, les émissions de CO₂ issues des centrales au gaz chutant de 273 à 175 Mt CO₂ et celles des centrales à pétrole de 50 à 37 Mt CO₂. Une tendance à laquelle centrales à charbon font exception: après avoir fortement diminué en 2008 et 2009, les émissions de CO₂ issues de ces centrales ont à nouveau augmenté entre 2009 et 2012, pour atteindre 846 Mt CO₂ en 2012. Cette hausse s'explique, d'une part, par le regain de compétitivité du charbon en tant que combustible pour les centrales thermiques en Europe (du fait de l'exportation de la production excédentaire du charbon des Etats-Unis vers l'Europe) et, d'autre part, par l'effondrement du prix du carbone en Europe, qui a cessé de pénaliser les centrales à charbon entre 2011 et 2013.

Le marché européen des quotas est le dispositif central de l'UE pour lutter contre les dérèglements climatiques. Afin d'atteindre les objectifs prévus par le paquet énergie-climat 2020 (20% d'énergie renouvelable, 20% d'efficacité énergétique et 20% de réduction des émissions de gaz à effet de serre), le rythme de réduction du plafond d'émission sera de 1,74% par an : le nombre de quotas disponibles en 2020 sera donc inférieur de 21% au nombre de quotas disponibles en 2005. De même, afin d'atteindre les objectifs fixés par le paquet énergie-climat 2030 (- 40 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre, + 27 % d'énergies renouvelables et 27 % d'amélioration de l'efficacité énergétique), une nouvelle trajectoire de réduction des émissions des secteurs participant à l'EU ETS de 43 % en 2030 par rapport à 2005 a été mise en place, soit une réduction annuelle linéaire du plafond d'émission de 2,2 % à partir de 2021.

Le 22 novembre 2007, la Commission européenne a présenté sa stratégie pour les technologies énergétiques (SET Plan) qui poursuit l'objectif de long terme suivant : « Soutenir le développement d'une nouvelle génération de technologies à faible intensité carbonique. Les actions à réaliser devraient se concentrer, entre autres, sur la compétitivité des nouvelles technologies en matière d'énergies renouvelables, le stockage de l'énergie, la durabilité de l'énergie de fission, l'énergie de fusion, ainsi que le développement des réseaux transeuropéens de l'énergie ».

Pour réaliser cet objectif, la Commission a prévu de lancer progressivement des initiatives industrielles européennes dans les secteurs définis comme prioritaires, à savoir l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la bioénergie, la capture, le transport et le stockage de CO₂, le réseau électrique, la fission nucléaire et l'hydrogène – sous forme de partenariats public-privé ou de programmes communs entre États membres. Ces programmes prévoient de « mettre en commun des ressources et de partager les risques pour développer de nouvelles technologies qui offrent un potentiel énorme mais sont actuellement loin du seuil de compétitivité sur le marché [...], pour faciliter la planification stratégique à la fois au niveau des technologies et au niveau des systèmes énergétiques pour assurer une approche commune des problèmes qui ont une dimension trans-frontalière ».

Au total, les investissements publics et privés dans le développement technologique pour les secteurs du plan SET sont passés de 3,2 Md€ en 2007 à 5,4 Md€ en 2010 (CE, 2013). Les entreprises assurent environ 70 % du total des investissements dans la recherche et l'innovation au titre des priorités du plan SET, les États membres 20 % et la Commission européenne 10 %.

Autant d'éléments qui mettent en évidence la complémentarité des mesures « technology push » et « market pull », et la nécessité de les combiner pour lutter efficacement contre le réchauffement climatique. Cependant, au regard de la place qu'elles vont prendre dans l'introduction des technologies bas carbone dans le secteur électrique, les mesures technology push méritent une attention particulière.

L'introduction des technologies bas carbone est, on l'a vu, complexe, car il s'agit d'innovations dont l'objet est d'offrir des externalités positives pour la collectivité, leur maîtrise n'est pas forcément susceptible de générer des avantages compétitifs pour les électriciens. De plus, la configuration du secteur électrique repose, plus encore que pour d'autres secteurs, sur une architecture systémique nécessaire pour assurer en permanence l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité⁶¹.

Or, les mesures demand pull qui stimulent la concurrence en diminuant le risque de marché n'encouragent pas les collaborations entre les acteurs. Par ailleurs, elles concernent principalement les technologies les plus proches du marché, qui ne sont pas nécessairement celles présentant le plus fort potentiel de diminution des émissions de CO₂. A l'inverse, les mesures de type technology push couvrent un spectre plus large et stimulent les interactions entre l'ensemble des parties prenantes du secteur électrique (électriciens, fournisseurs d'équipements, centres de recherche, ...).

⁶¹ Cf. Chapitre I, section [2.2 Le cas du secteur électrique en Europe](#).

2.2 LE ROLE DES COLLABORATIONS POUR FACILITER L'INTRODUCTION DES INNOVATIONS ENVIRONNEMENTALES

L'introduction des technologies bas carbone requiert également de surmonter des obstacles socio-techniques tels que l'interconnexion des technologies entre elles, ou le fait que les efforts et les compétences des ingénieurs soient essentiellement dirigés vers les technologies fossiles. Dans ces conditions, si l'action publique incite au déploiement des technologies bas carbone, ce levier d'action est insuffisant (Rennings, 2000). Par ailleurs, aussi souhaitables que soient les interactions entre utilisateurs et producteurs au sein de niches de marché, elles risquent de se révéler insuffisantes pour assurer l'introduction de technologies bas carbone au sein du secteur électrique dans son ensemble. Dans la mesure où les électriciens disposent encore de savoirs limités et que le secteur électrique doit réaliser une transformation structurelle, il est nécessaire d'identifier des leviers complémentaires susceptibles de favoriser l'acquisition de nouvelles connaissances.

La « famille » des innovations environnementales regroupe l'ensemble des technologies ayant un impact positif sur l'environnement, dont, logiquement, les technologies bas carbone. Andersen et Foxon (2009) ont étudié le caractère systémique des innovations environnementales, résultant des inter-dépendances entre les entreprises pour les développer et les implémenter. Dans la mesure où la plupart des compagnies sont inexpérimentées pour traiter des enjeux environnementaux, elles ont tendance à s'appuyer sur des sources externes de savoir et de compétences ; les collaborations vont représenter un levier majeur pour faciliter l'introduction des innovations vertes (Mazzanti et Zoboli 2005). Parmi elles, trois types de collaborations semblent particulièrement profitables : celles qui permettront aux électriciens de devenir adopteurs de technologies, celles qui aideront à la définition des standards, et, enfin, celles avec les nouveaux entrants, source d'actifs complémentaires.

Allen (1983) définit l'« invention collective » comme une création associée à la coopération de différentes entités et caractérisée par l'échange et la diffusion gratuite de connaissances et d'informations entre agents socialement connectés. Des règles spécifiques encadrent le partage des connaissances produites, afin d'encourager diffusion et retombées économiques, tout en protégeant la propriété à travers, par exemple, le dépôt de brevets. Les collaborations peuvent ainsi associer une large variété d'acteurs (tels que les centres de recherche publics ou privés, les clients, les fournisseurs voire les concurrents) au processus d'innovation, tout en facilitant, par là même, la diffusion.

Collaborer lors du processus d'innovation présente plusieurs avantages. Les innovations, fruits de coopérations, peuvent potentiellement offrir des performances supérieures à celles créées individuellement, bénéficient de compétences complémentaires et leur accumulation rapide multiplie les chances de voir l'innovation adoptée par le marché. De plus les collaborations conduites dans le cadre du processus d'innovation permettent, à la fois, de réduire les coûts de transactions et de partager les risques (Miotti et Sachwald, 2003; Lokshin et Belderbos, 2004).

L'analyse de Horbach (2008) montre que la collaboration technologique avec des partenaires externes se révèle tout particulièrement cruciale dans le cas des innovations vertes. En effet, celles-ci exigent généralement des efforts de coopération plus intenses et impliquent des complémentarités plus fortes des partenaires (Andersen, 1999, 2002; Andersen et Foxon, 2009). Une théorie corroborée par les analyses empiriques : Mazzanti et Zoboli (2005) démontrent que les activités en réseaux constituent un levier majeur pour l'innovation environnementale, bien plus que des caractéristiques structurelles telles que la taille de l'entreprise. Pour les deux auteurs de l'étude, les accords de coopération, qu'ils qualifient d'« économies d'échelle horizontales » ont « peut-être plus d'importance que les économies d'échelle internes ». Le fait que le processus d'innovation en réseau se révèle comme un puissant stimulant du développement des technologies environnementales (Andersen, 1999, 2002; Geffen and Rothenberg, 2000) s'explique pour les raisons suivantes :

- Les innovations environnementales font l'objet d'interdépendances plus fortes avec les partenaires externes en raison de leurs caractéristiques systémiques et complexes (Theyel, 2006; Seuring et Müller, 2008).
- Le développement des technologies environnementales implique des connaissances et des compétences qui s'inscrivent en dehors du champ traditionnel d'expertise de la plupart des entreprises ; d'où une multiplication des échanges afin de limiter le risque technologique (Bayona et al., 2010; Miotti et Sachwald, 2003).

On peut distinguer trois types de collaborations : avec les nouveaux entrants, entre électriciens et avec l'ensemble des parties prenantes (démarche dite « d'open innovation »).

Alors que pendant longtemps, la logique de l'innovation fermée a été considérée comme étant le modèle de référence, Chesbrough (2003) souligne les opportunités soulevées par les modèles ouverts d'innovation pour la création de valeur des entreprises. Dans un modèle d'innovation « fermée », les entreprises adhèrent au principe selon lequel le succès d'une innovation dépend de leur capacité à la contrôler de bout en bout. Les entreprises leader se voient contraintes d'investir significativement plus dans la recherche que leurs concurrents et de recruter les meilleurs scientifiques disponibles sur le marché. Grâce à de tels investissements, elles sont à même de donner naissance aux « meilleures inventions », puis de les diffuser massivement auprès du marché. En retour, elles disposeront d'avantages compétitifs et engrangeront la plupart des profits tirés de leur commercialisation. Parallèlement, les entreprises protégeront ces dernières en contrôlant la propriété intellectuelle afin de limiter leur exploitation par les concurrents. Les bénéfices seront partiellement réinvestis dans des activités de R&D, elles-mêmes génératrices de nouvelles percées et inventions, créant ainsi un cercle vertueux, selon un modèle qui a dominé la vision industrielle durant la quasi-totalité du XX^{ème} siècle.

Vers la fin du XX^{ème} siècle toutefois, un certain nombre de facteurs concourent à l'érosion des bases du modèle d'innovation fermée, parmi lesquels la mobilité accrue des scientifiques, qui rend beaucoup plus difficile le contrôle de leurs idées et de leur expertise, ou la multiplication des fonds de capital investissement, qui participeront au soutien de nouvelles

entreprises et au financement des efforts de commercialisation d'innovations en dehors du cadre des laboratoires de recherche des entreprises. Dans ce nouveau contexte, l'alternative proposée par le modèle d'innovation ouverte s'impose progressivement.

Ce nouveau modèle est bâti sur l'idée de base que la frontière entre une entreprise et son environnement immédiat est plus poreuse, d'où une plus grande mobilité des innovations, et repose sur deux principes conducteurs :

- les entreprises peuvent commercialiser des innovations qu'elles auront créées au sein de leur organisation, à travers des accords de licence, sans pour autant les utiliser elles-mêmes.
- elles peuvent s'appuyer sur des innovations développées à l'extérieur de leurs laboratoires de R&D et les rapatrier à l'intérieur de l'organisation à des fins de commercialisation.

Ainsi, les organisations ne doivent pas limiter à leurs canaux internes la diffusion des innovations réalisées dans le cadre de leurs travaux de recherche, ni restreindre au marché la diffusion des innovations générées en interne.

Les principales différences entre l'innovation fermée et l'innovation ouverte concernent :

- La question du verrouillage de la propriété intellectuelle. Dans le cas de l'innovation ouverte, l'organisation ne considère plus que la totalité de ses innovations doit être à son usage exclusif. Elle doit identifier comment des interactions avec d'autres acteurs lui permettront de tirer avantage de la technologie selon diverses modalités de collaboration - par exemple par des accords de licence.
- La sélection des innovations. A travers le processus de R&D, l'organisation poursuit l'expérimentation des idées prometteuses et abandonne celles qui ne semblent pas l'être. Or, une entreprise adepte du modèle d'innovation fermée est susceptible de manquer un certain nombre d'opportunités dans la mesure où certaines innovations ne pourront se révéler rentables que, si et seulement si, elles sont agrégées à des technologies ou des capacités externes.

L'entreprise Hollanders a établi, en 2007, dans le cadre du projet Europe Innova 1, une distinction entre profils d'innovateurs : une entreprise peut être considérée comme innovante en générant (« technology provider ») ou bien en adoptant (« technology user ») des innovations. Les « générateurs » mènent des opérations de Recherche et Développement en interne et peuvent ensuite déployer directement leur innovation sur le marché ou bien s'appuyer sur d'autres acteurs pour le faire. En revanche, les adopteurs n'introduisent pas sur le marché des innovations issues de leur propre laboratoire, mais diffusent celles développées par des tiers.

Dans la mesure où le secteur électrique s'appuie sur un système où acteurs et technologies sont interconnectés, la démarche d'innovation ouverte est une démarche souhaitable. Elle

permettra aux électriciens d'associer l'ensemble parties prenantes à la définition des standards et non plus seulement les utilisateurs, comme dans le cadre des niches.

Ce nouveau modèle devrait permettre aux électriciens de développer les innovations technologiques bas carbone dans un contexte difficile : la libéralisation du secteur a, en effet, conduit à la diminution des dépenses de R&D (Jamasb et Pollit, 2006 ; Salies, 2011⁶²). L'incertitude relative à la compétition à laquelle les acteurs du secteur ont été exposés a induit une préférence pour les bénéfices à court terme et un aléa sur la capacité à valoriser les dépenses de R&D à long terme, d'où une baisse des budgets dédiés à cette activité. Alors qu'à la date de l'étude de Jamasb et Pollit, la question de la transition énergétique était bien moins brûlante qu'aujourd'hui, les auteurs alertaient déjà sur les conséquences des diminutions des dépenses de R&D, selon eux susceptibles « d'affecter négativement le développement d'innovations radicales dans le long terme ». Or, dans un contexte où les enjeux du changement climatique relèvent précisément de défis de long terme, la question de la capacité du secteur à générer suffisamment d'innovations est au cœur des préoccupations. Dans la mesure où l'on assiste à une baisse des moyens dédiés à ce secteur et consécutivement du nombre d'inventions, les électriciens gagneront à se positionner en adopteurs d'innovations. L'enjeu n'est donc plus de développer de la propriété intellectuelle protégée, mais d'adopter les technologies développées par des tiers afin de générer nouvelles connaissances et savoir-faire.

De plus, bien que des entreprises présentes sur un même marché et offrant des services identiques entretiennent la plupart du temps des relations de nature compétitive, elles peuvent néanmoins décider de coopérer, selon le concept de coopétition élaboré par Nalebuff et Brandenburger (1996).

Dans la vision concurrentielle classique des relations inter-firmes, la coopération est inenvisageable, voire condamnée en tant qu'entente susceptible de fausser le jeu concurrentiel. A l'opposé de ce paradigme concurrentiel, le paradigme « relationnel » met principalement l'accent sur la coopération (Dyer et Singh, 1998). Selon cette approche, une firme établit et renforce sa compétitivité en développant des alliances stratégiques, des réseaux, ou des stratégies collectives (Astley et Fombrun, 1983; Yami et Le Roy, 2007). La capacité à entrer en relation permet d'accéder à de nombreuses ressources et de créer un avantage relationnel. Pour Lado et al. (1997), les firmes doivent mener des stratégies coopératives, que ce soit pour contrer leurs concurrents, ou pour mutualiser leurs ressources et échanger du savoir.

La coopétition permet de concilier les bénéfices de la compétition et ceux de la collaboration. Elle naît d'un rapprochement d'intérêts entre « complémentaires », qui survient quand la compétition et la coopération se produisent simultanément. Définie comme une « relation dyadique et paradoxale qui émerge quand deux entreprises coopèrent dans quelques activités, et sont en même temps en compétition l'une avec l'autre sur d'autres activités », elle relève

⁶² Billet publié dans le blog de l'OFCE le 14 novembre 2011 <http://www.ofce.sciences-po.fr/blog/rd-a-la-derive-les-producteurs-deelectricite-ont-ils-disjoncte/>

d'une forme de relation entre concurrents qui combine à la fois des échanges économiques et non économiques, et peut se produire dès lors que « les besoins en ressources extérieures sont forts et les positions respectives sur un secteur particulièrement marquées » (Benson et Kock, 1999).

De nombreux chercheurs considèrent que coopérer avec des concurrents atténue les inefficiences de la concurrence, améliore les flux d'informations, contribue aux économies d'échelle, réduit l'incertitude et les risques et accélère le développement de nouveaux produits (Das & Teng, 2000; Ingram & Roberts, 2000; Gnyawali & Park, 2011). Les travaux de recherche récents sur la coopétition ont reconnu la valeur des tensions qui résultent de l'interaction simultanée entre la coopération et la concurrence.

Les caractéristiques de la transition énergétique du secteur électrique européen rendent tout particulièrement souhaitable la coopération entre électriciens. Tout d'abord, parce que la configuration actuelle du secteur électrique répond à la définition de Bengtsson et Kock. Les activités de production, de transmission et de distribution d'électricité sont concentrées au sein de chacun des pays européens et les ressources extérieures d'autant plus précieuses que les électriciens disposent de connaissances plus limitées sur les domaines bas carbone. De plus, la transformation du secteur électrique appelle à la définition de nouveaux standards, en particulier dans le domaine des réseaux ; d'où la nécessité de se coordonner pour les définir. Enfin, l'enjeu de l'introduction des technologies bas carbone relève de la limitation du risque technologique ; en collaborant, les électriciens partageront les connaissances et contribueront ainsi à le limiter.

Dans la mesure où le développement des technologies bas carbone nécessite des compétences qui ne sont pas encore disponibles chez les électriciens, les « nouveaux entrants » sont amenés à jouer un rôle déterminant.

Schumpeter considère ces acteurs comme les mieux placés pour devenir des « entrepreneurs innovateurs » et bousculer les équilibres de marché. En introduisant de nouveaux socles de connaissances et des produits aux performances alternatives, les nouveaux entrants favorisent le passage d'un régime routinier à un régime entrepreneurial (Malerba et Orsenigo, 1997). Le « régime routinier », fondé sur quelques entreprises dominantes ayant adopté un processus continu d'innovations à travers l'accumulation de capacités technologiques au fil du temps, s'oppose au régime entrepreneurial, caractérisé par le faible niveau d'accumulation des connaissances. La présence de nouveaux acteurs, lesquels ne sont pas bloqués dans l'architecture dominante, tend à développer des innovations qui vont éroder les avantages compétitifs et technologiques des entreprises établies. Les compétences développées par les entreprises en place deviendront dès lors obsolètes (Tushman et Anderson, 1986), et ces acteurs progressivement évincés du marché.

Différentes études se sont penchées sur les collaborations entre nouveaux entrants et firmes établies, rendues possible par la complémentarité des actifs (Tripsas, 1997) détenus par ces acteurs. En règle générale, les nouveaux entrants découvrent et développent de nouveaux produits en s'appuyant sur de nouvelles technologies, tandis que les entreprises en place les commercialisent (Williamson, 1985). Des partenariats qui permettent aux nouveaux entrants

d'accéder aux canaux de distribution de l'entreprise établie et de gagner en réputation, alors que conjointement l'entreprise en place accède à de nouvelles connaissances qu'il lui aurait été difficile de développer en interne. Teece (1986) souligne, par ailleurs, que les entreprises en place « totalement intégrées » sont les mieux positionnées pour bénéficier des innovations en exploitant les actifs complémentaires, et tirent davantage profit des collaborations que les nouveaux entrants.

Dans le cas du secteur électrique, l'arrivée des nouveaux entrants modifiera les équilibres en présence. Que ce soit dans le cas des technologies d'addition qui, par définition, s'ajouteront au système électrique existant, ou de celui des technologies de substitution, les électriciens devraient entretenir des relations collaboratives plus que compétitives avec les nouveaux entrants. Certes, des électriciens se spécialisant dans la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables⁶³ entreront en concurrence avec les acteurs établis, mais il est toutefois peu probable que les électriciens établis soient évincés du marché comme cela a pu être observé dans le cas des transitions technologiques touchant d'autres secteurs d'activité. Premièrement, parce que les électriciens cherchent à acquérir les producteurs d'électricité renouvelables dès lors qu'ils ont atteint une taille critique⁶⁴. En second lieu, parce que, contrairement aux transitions technologiques réalisées par ailleurs, qui se comptent en années, la transition énergétique du secteur électrique devrait se dérouler sur plusieurs décennies, laissant, de ce fait, un laps de temps suffisant aux électriciens pour se préparer et réagir aux menaces des nouveaux entrants. Lesquels, évoluant en dehors de l'architecture thermique dominante, devraient pouvoir développer plus facilement que les électriciens établis, les technologies bas carbone.

Ces nouveaux entrants peuvent être des « adjacents » (Erlinghagen et Markard, 2012) ou des jeunes entreprises. Les adjacents sont des entreprises historiquement établies dans un secteur différent du secteur électrique, pour lesquels les enjeux de réduction des émissions du secteur électrique représentent de nouveaux débouchés commerciaux. Les jeunes entreprises ne sont, par définition, pas ancrées dans l'architecture thermique et peuvent donc développer de manière plus agile les technologies et le savoir-faire en mesure de limiter les émissions de CO₂.

Les collaborations avec les nouveaux entrants, qu'il s'agisse de start up ou d'entreprises établies dans d'autres secteurs, permettront aux électriciens de générer de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire relatifs aux technologies bas carbone ; elles devraient fournir aux électriciens des actifs complémentaires et constituer un levier déterminant pour l'introduction des technologies bas carbone.

⁶³ En particulier sur les photovoltaïque et l'éolien qui sont les énergies renouvelables les plus matures.

⁶⁴ Cf. Chapitre V – [Analyse des stratégies d'innovation des électriciens](#).

3.CONCLUSION

Parmi les leviers susceptibles d'influencer le déploiement de technologies bas carbone par les électriciens, nous avons mis tout d'abord l'accent sur les mesures publiques de type « technology push » destinées à limiter le risque technologique et favoriser la coordination des acteurs. Par ailleurs, il nous est apparu que trois types de collaborations méritent une attention particulière : le niveau de *collaboration avec les nouveaux entrants* qui permettent aux électriciens de disposer d'actifs complémentaires, le niveau de *collaboration avec les autres électriciens* (« coopération ») qui favorisent la mise en commun des connaissances et la définition commune des standards et le niveau de *co-construction de l'innovation qui permet d'identifier dans quelle mesure les électriciens sont plutôt des adopteurs ou des générateurs d'innovation*. Ces différents modes de collaboration entre acteurs, serviront de base aux catégorisations auxquelles nous recourons dans notre analyse empirique.

CHAPITRE III - UN CADRE D'ANALYSE POUR CARACTERISER LES STRATEGIES D'INNOVATION DU SECTEUR ELECTRIQUE

Les stratégies d'innovation du secteur électrique européen méritent une attention particulière en raison de la singularité de la transition énergétique. Pour déconnecter la production d'électricité des émissions, la technologie est amenée à jouer un rôle encore plus important qu'elle n'a joué par le passé. Les scénarios de réduction des émissions de CO₂ (AIE, 2015b) mettent en évidence la nécessité d'introduire une large variété de technologies qui concernent l'ensemble de la chaîne de valeur électrique, ce qui motive notre objectif de couvrir les cinq grands domaines suivants : CCS, nucléaire, énergies renouvelables, hydrogène et smart grids.

Dans ce chapitre, nous préciserons les questions de recherche, puis nous définirons un cadre d'inspiration évolutionniste qui permettra d'effectuer une analyse au niveau des technologies bas carbone du secteur électrique dans son ensemble et de chacun de ses acteurs pris séparément. Dans un second temps nous présenterons les données mobilisées concernant combinaison des brevets et des projets collaboratifs qui permettent de couvrir à la fois le mode d'élaboration de solutions technologiques nouvelles (via les projets) et le résultat de ces efforts (via les brevets). En outre, les projets collaboratifs menés dans le cadre du 7^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement constituent des expérimentations associant une variété de parties prenantes (électriciens, fournisseurs de technologies de production, acteurs des logiciels ...) en vue de stimuler des innovations bas carbone s'appuyant sur de nouvelles connaissances et cela au travers d'un dispositif réglementaire initié par la Commission européenne. Enfin, nous présenterons la méthodologie mise en œuvre pour analyser la stratégie technologique et celle mobilisée pour analyser les stratégies d'acquisition des connaissances.

1. DELIMITATION D'UN CADRE D'ANALYSE

Les domaines de substitution technologique (hydrogène et énergies renouvelables) devraient faire l'objet d'un engagement d'une intensité supérieure à celui observé pour les innovations relevant de l'addition (CCS, smart grids et nucléaire). La disparité de connaissances entre substitution énergétique et addition laisse logiquement présager une démarche plus « ouverte » dans le cas des premières. De plus, dans la mesure où les électriciens les plus dépendants des énergies fossiles sont, par définition, ceux qui nécessitent prioritairement un basculement vers des unités plus sobres en carbone, on peut attendre de ces derniers un engagement davantage orienté vers les technologies de substitution. Enfin, les électriciens affichant l'intensité carbone la plus élevée sont également ceux qui devraient mettre en œuvre la démarche d'acquisition de nouvelles connaissances la plus ouverte.

Notre cadre est destiné à vérifier les hypothèses suivantes :

- *Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.*
- *Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition.*
- *Hypothèse 3 : les électriciens dont l'intensité carbone est la plus élevée font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs.*
- *Hypothèse 4 : les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte.*

Pour notre analyse, nous avons choisi de mobiliser un cadre d'inspiration évolutionniste. Ce courant repose sur l'idée conductrice de « variation – sélection – réplication »⁶⁵, adapté à la situation des électriciens dans un contexte de transition énergétique. Les électriciens poursuivaient une trajectoire concentrée sur la maîtrise des procédés thermiques et hydrauliques ; ils devront désormais la modifier pour y inclure une large variété de domaines, et se constituer un portefeuille en sélectionnant des technologies bas carbone en « compétition » les unes avec les autres. Par ailleurs, les innovations environnementales sont systémiques⁶⁶ et l'acquisition des nouvelles connaissances par les électriciens passe impérativement par des interactions entre les différentes parties prenantes. L'approche évolutionniste, qui s'attache à « tenir compte des systèmes sociaux et institutionnels, et à

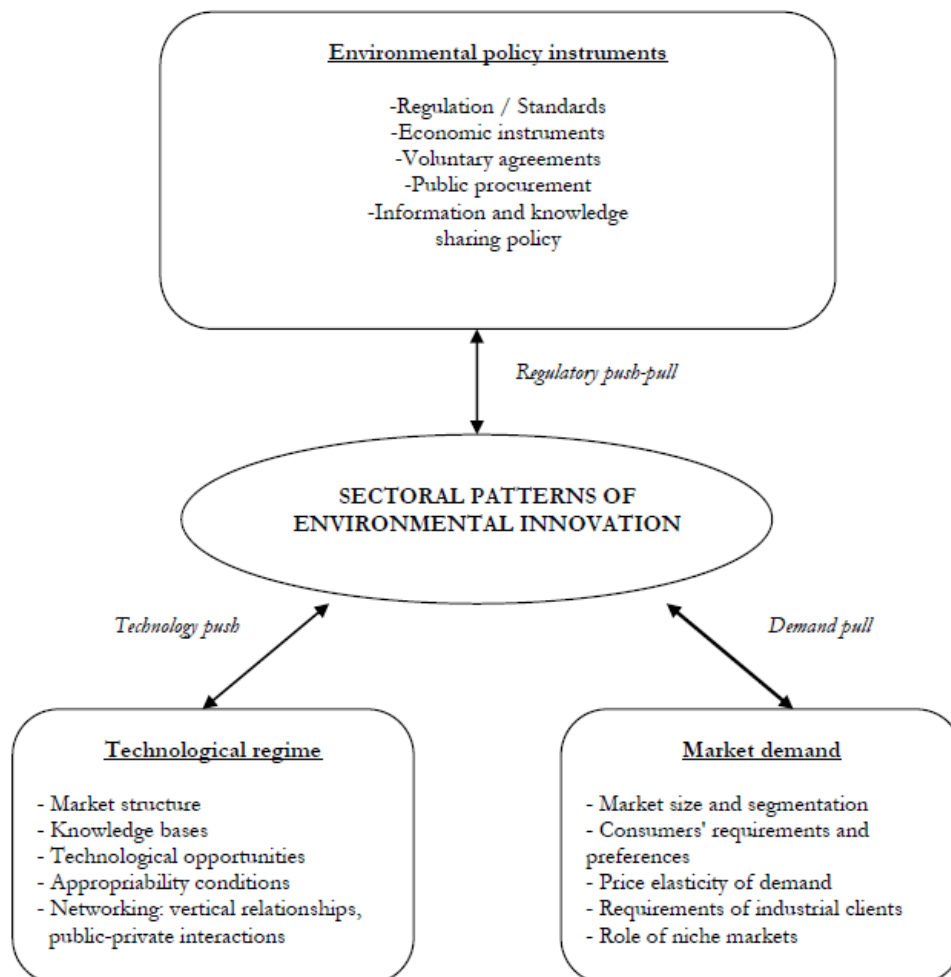
⁶⁵ Ce mécanisme a été documenté dans le Chapitre II, section [1.1 Les fondements de la compétition technologique](#).

⁶⁶ Cf. Chapitre II, section [1.2 Les contraintes spécifiques à l'introduction des technologies bas carbone dans le secteur électrique](#).

mettre en évidence l'importance de leurs interactions» (Rennings, 2000), constitue donc une perspective cohérente pour étudier les différents mécanismes à l'œuvre.

Conceptualisées par Nelson et Winter (1982), les approches évolutionnistes ont régulièrement été mobilisées à des fins d'analyse notamment pour comprendre les interactions systémiques. En 2002, Malerba a défini le concept de « système d'innovation sectoriel » qui vise à identifier, pour un secteur donné, les facteurs qui affectent l'innovation et la compétitivité des entreprises, en vue de développer de nouvelles orientations de politique publique, intègre donc les déterminants procédant de l'offre et de la demande. En considérant les innovations comme l'aboutissement d'un processus dynamique et interactif de création et de diffusion de savoirs, l'étude est axée sur la coévolution entre les différents éléments du système ; un cadre qui se prête à l'analyse des tendances sectorielles de l'innovation environnementale comme la résultante de l'interaction entre les régimes technologiques, la demande du marché et les politiques publiques.

Figure 22 : Système sectoriel de l'innovation



Source : Malerba (2002)

Pour définir plus spécifiquement le régime technologique d'un secteur considéré, Malerba et Orsenigo (1996, 1997, 2002) proposent de s'appuyer sur les « déterminants technologiques »

suivants : les opportunités technologiques, soit la capacité d'un environnement à faire évoluer ses processus, ses produits ou son système de distribution. La base des connaissances, qui intègre le caractère spécifique et complexe du régime, mais également l'origine du savoir, et dans quelle mesure il est appelé à évoluer. Les conditions d'appropriation, qui définissent l'avantage concurrentiel dont un innovateur dispose sur ses concurrents, - concept qui pose en creux la question des modalités de protection des connaissances générées. Les effets cumulatifs de l'innovation, enfin, à l'origine du phénomène de dépendance au sentier, et qui déterminent les sources de l'innovation, en particulier dans les secteurs où la dynamique d'innovation émane d'entreprises déjà en place.

Autant de déterminants technologiques qui établiront la distinction entre régimes entrepreneuriaux et routiniers. Le régime routinier est fondé sur quelques entreprises dominantes ayant adopté un processus continu d'innovation grâce à l'accumulation, au fil du temps, de capacités technologiques. Inversement, le régime entrepreneurial est caractérisé par une base d'innovation en développement constant en raison de l'entrée sur le marché de nouveaux acteurs innovants et de l'érosion des avantages compétitifs d'entreprises déjà en place.

Le système d'innovation sectoriel a, par exemple, été le cadre choisi par Oltra et Saint Jean (2009) pour analyser la tendance d'innovation du secteur automobile en France. Ils ont démontré par ce biais que les procédés de moteur à combustion interne, en particulier le diesel, continuent d'être les technologies dominantes, et ce malgré l'intérêt croissant porté aux technologies hybrides. Ils ont également mis en évidence que les caractéristiques de la demande du marché automobile tendent à favoriser davantage les innovations incrémentales que celles s'appuyant sur de nouvelles connaissances. Le renouvellement lent du parc automobile, la spécialisation sur des segments d'entrée de gamme, les préférences pour les voitures diesel ainsi que la sensibilité des consommateurs où le prix et le niveau de consommation de carburant se révèlent ici source d'inertie technologique.

Ce cadre d'analyse permet donc d'appréhender globalement la dynamique d'innovation d'un secteur en tenant compte aussi bien du rôle de la demande que de celui de l'offre technologique – mais paraît néanmoins trop restreint compte-tenu des particularités de la transition qui nous occupe.

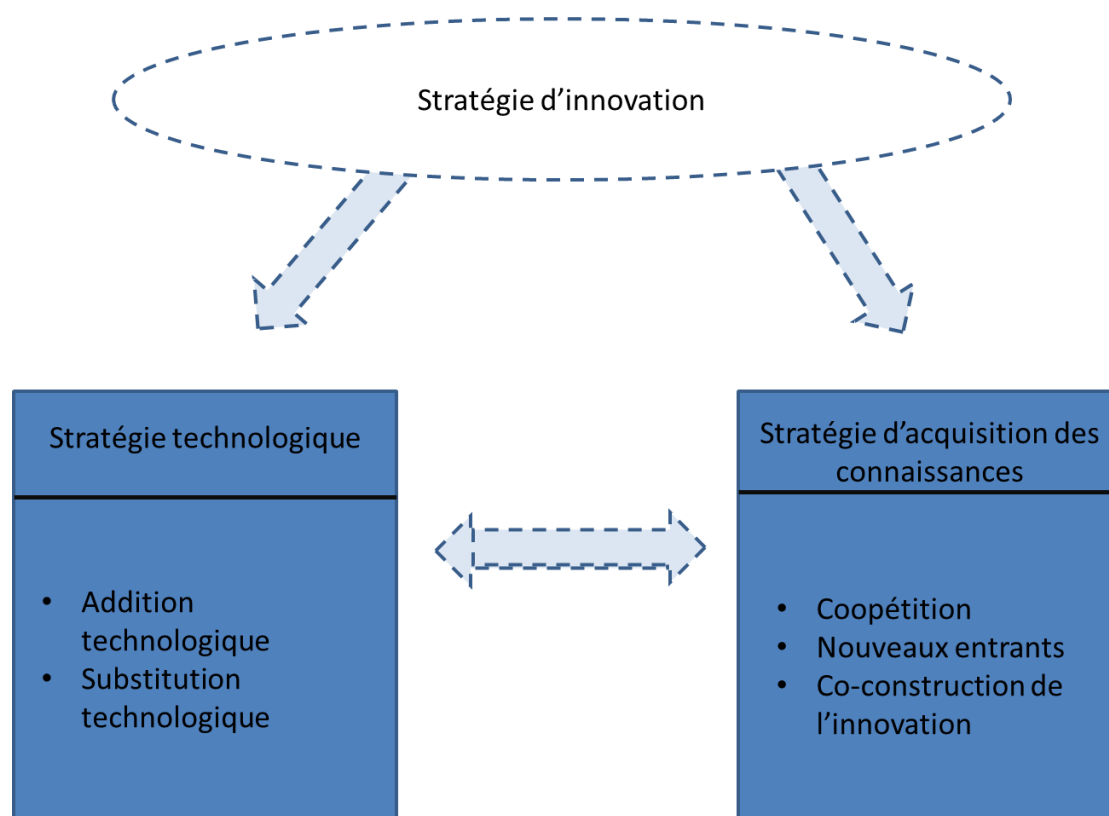
En effet, s'il offre la possibilité, par construction, d'analyser les tendances d'innovation au niveau de l'ensemble du secteur, il n'est pas à même de procéder à des analyses au niveau des acteurs, ce qui, au regard de la singularité des marchés nationaux européens de l'électricité, représente un exercice incontournable. Deuxième écueil, le marché de l'électricité est caractérisé par l'échange d'une commodité non différenciée et ne peut donc faire l'objet d'innovation « de produit »⁶⁷. Ce qui implique que la demande ne pourra pas être caractérisée

⁶⁷ Le Manuel d'Oslo, dont la troisième version a été publiée par l'OCDE en 2005, définit quatre types d'innovation : les innovations de produit, les innovations de procédé, les innovations de commercialisation et les innovations d'organisation. L'innovation de produit concerne l'introduction d'un bien ou d'un service nouveau. Cette définition inclut les améliorations sensibles des spécifications techniques, des composants et des matières, du logiciel intégré, de la convivialité ou autres caractéristiques fonctionnelles. Les innovations de procédé font référence à la mise en œuvre d'une méthode de production ou de distribution nouvelle ou

selon les critères proposés (segmentation, niche, élasticité de la demande à court terme...). Par ailleurs la transition énergétique du secteur électrique se singularise par l'importance et la complexité du rôle joué par l'offre ; il est indispensable de considérer l'introduction de toute une variété de domaines technologiques portant sur l'ensemble de la chaîne de valeur, et ce dans un processus associant addition et substitution. Autant de paramètres (distinctions entre substitution et addition, enjeux de l'introduction simultanée d'une multiplicité de procédés sur l'ensemble de la chaîne de valeur) que le système sectoriel d'innovation ne permet pas de traiter. Enfin, ce cadre d'analyse propose d'examiner les cas de compétition technologique sous l'angle de la distinction entre régimes entrepreneuriaux et routiniers. Or, la transition du secteur électrique se singularise à cet égard : les électriciens, mus par la nécessité d'acquérir de nouvelles connaissances sur les techniques bas carbone, doivent coordonner l'ensemble des parties prenantes. Alors même que les collaborations vont donc représenter un levier majeur, le système sectoriel d'innovation ne propose aucun outil pour explorer cette question-là.

Au regard des questions de recherche définies plus haut, il a donc semblé nécessaire de constituer un cadre d'analyse ad hoc (Figure 23) susceptible de tenir compte de la spécificité de la transition qui nous occupe.

Figure 23 : Cadre conceptuel d'analyse des stratégies d'innovation du secteur électrique



Source : auteur

sensiblement améliorée. Cette notion implique des changements significatifs dans les techniques, le matériel et/ou le logiciel. La plupart des domaines technologiques considérés s'inscrivent dans la catégorie des innovations de procédé.

Propre à analyser indifféremment un acteur ou un ensemble d'acteurs, un domaine ou un ensemble de domaines technologiques, ce cadre a été conçu expressément pour permettre de répondre à la problématique définie en début de section. L'analyse des stratégies technologiques, qui intègre le caractère particulier de cette transition combinant à la fois addition et substitution⁶⁸, a pour but de valider ou non deux des hypothèses formulées en préalable : à savoir si les domaines de substitution font l'objet d'un engagement plus soutenu que ceux relevant de l'addition et, si les électriciens à l'intensité carbone la plus élevée sont également ceux qui s'engagent le plus fortement dans les domaines de la substitution. Elle doit ensuite participer à déterminer si les domaines technologiques explorés en priorité à l'échelle du secteur sont les mêmes que ceux observés au niveau individuel des électriciens.

Dans la mesure où l'introduction des innovations bas carbone se déroulera dans des conditions inédites⁶⁹, l'analyse des stratégies d'acquisition des connaissances constitue la seconde dimension de notre cadre, et adresse les deux autres hypothèses énoncées : déterminer, à travers l'examen des différentes formes de collaborations, si les technologies de substitution s'inscrivent dans une démarche plus ouverte que celles d'addition, et si les électriciens les plus dépendants des énergies fossiles sont ceux qui privilégient également une démarche plus ouverte en matière d'acquisition des connaissances. Une recherche qui devrait également contribuer à identifier les électriciens et les domaines technologiques les plus ouverts, et à en comprendre les raisons.

En outre, cette section doit permettre d'apprécier le comportement des acteurs et des domaines technologiques sur chacun des trois critères d'ouverture identifiés en tant que leviers complémentaires à la transition actuelle⁷⁰. Tout d'abord, le niveau de coopération, indicateur significatif de l'intensité de la collaboration d'un électricien sur un domaine technologique (ou un ensemble de domaines) donné avec ses compétiteurs. Ensuite, le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants, source d'actifs complémentaires. Enfin, le niveau de co-construction de l'innovation, qui participera à apprécier la propension d'un électricien (ou d'un ensemble d'électriciens) à développer sur un domaine technologique (ou un ensemble de domaines) de l'innovation en lien avec son écosystème. Autant de critères qui aideront également à répondre aux questions connexes suivantes : l'innovation des électriciens est-elle stimulée par les nouveaux entrants ? Quels sont les domaines qui font l'objet d'une politique de partage de connaissances restreinte par la volonté de se constituer des avantages compétitifs et, au contraire, ceux qui vont privilégier une diffusion plus large du savoir en vue de stabiliser rapidement la technologie ?

Enfin, il est tout-à-fait envisageable que certains domaines technologiques disposent de caractéristiques intrinsèques telles que les modalités d'acquisition des connaissances soient conditionnées à la stratégie technologique, auquel cas, la démarche d'acquisition des connaissances résulterait du positionnement technologique. Il sera donc nécessaire d'évaluer

⁶⁸ Cf. les conclusions du Chapitre I, section [3.Conclusion](#).

⁶⁹ Cf. les conclusions du Chapitre II, section [3.Conclusion](#).

⁷⁰ Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

dans quelle mesure la stratégie d'acquisition des connaissances est formalisée par les acteurs ou, au contraire, dépendante de cette stratégie.

2. PRESENTATION DES DONNEES

Une fois le cadre posé, il s'agit, en premier lieu, de définir quels électriciens se prêtent de façon la plus pertinente à l'étude des stratégies d'innovation du secteur électrique, et pourquoi. Les six électriciens européens suivants (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola, et RWE) ont été retenus pour un ensemble de raisons présentées ci-après. En second lieu, il convient de démontrer en quoi les données sélectionnées – à savoir les brevets et des projets collaboratifs - ont paru les plus congruentes à notre étude.

2.1 LE PERIMETRE DES ELECTRICIENS RETENUS

Pour analyser au mieux les stratégies d'innovation mises en œuvre à l'échelle du secteur électrique européen, nous avons choisi d'agréger les données issues des six électriciens suivants : EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola, et RWE. Tout d'abord, parce que ce sont les principaux producteurs d'électricité à l'échelle européenne, et se trouvent donc présentement au cœur de la transition énergétique du secteur électrique européen. Au regard de leur pays d'origine (Allemagne, Espagne, France et Italie), de la diversité de leur portefeuille d'activité (certains sont principalement actifs sur le gaz, d'autres sur l'électricité, certains présents sur l'ensemble de la filière électricité, d'autres sur un nombre limité de segments) et de leur mix électrique varié⁷¹, ces électriciens présentent de surcroît un ensemble hétérogène, aux stratégies d'innovation contrastées. Enfin, parce que ces électriciens sont cotés sur les principales bourses européennes et donc soumis à des obligations de communication, le travail de documentation est, par rapport à ce qu'il serait pour des acteurs aux capitaux privés dispensés de semblables obligations, facilité.

2.2 LE CHOIX DES BREVETS ET DES PROJETS COLLABORATIFS COMME PROXYS DE L'INNOVATION

Le choix des proxys de l'innovation est une problématique. L'analyse des budgets consacrés à la R&D peut, dans certains cas⁷², se révéler utile pour apprécier les capacités d'innovation des entreprises et les comparer entre elles, mais, dans la mesure où les électriciens ne

⁷¹ Nous documenterons précisément les profils des électriciens dans le [Chapitre V-Etude de cas : Une approche par électricien](#)

⁷² Nous pouvons, par exemple, citer ici l'initiative EU Industrial R&D Investment Scoreboard qui présente chaque année des informations économiques et financières des 2500 compagnies consacrant le budget le plus élevé à l'activité de R&D. Cf le site internet de l'initiative : http://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/facts-figures/scoreboards/index_en.htm.

communiquent pas sur la répartition de leurs dépenses en fonction des domaines explorés, cet indicateur présente donc, dans notre cas, un intérêt limité. C'est pourquoi il a semblé plus pertinent de mobiliser les brevets et les projets collaboratifs. Les données des brevets et des projets sont accessibles et disponibles, et, ce, pour un large périmètre d'électriciens et sur une période suffisamment longue. Si la première utilisation des brevets en tant que source de documentation remonte seulement à 1981, par Griliches, elle sera, par la suite, régulièrement usitée pour traiter des questions d'innovations environnementales et bas carbone (Popp, 2002, Cabel et Dechezleprêtre, 2012). Les projets ont servi de base aux travaux de Giordano et al. (2011) et de Erlinghien et Markard, (2012). Ainsi qu'il sera expliqué dans la section dédiée à la méthodologie⁷³, la combinaison de ces deux proxys permettra de couvrir l'ensemble des critères retenus, et de répondre à la problématique définie en préalable.

Un brevet est un titre de propriété industrielle qui confère à son titulaire un droit d'interdiction de l'exploitation de l'invention par un tiers et pour une durée limitée plafonnée à vingt ans. En contrepartie de l'exclusivité de l'exploitation, le titulaire publie le contenu de l'invention en l'enregistrant auprès d'un office national, régional ou international. Pour qu'un brevet puisse être octroyé à une invention, celle-ci doit satisfaire certains critères, en particulier la nouveauté, la non-évidence (caractère inventif), et le caractère d'utilité d'un point de vue industriel.

L'octroi des premiers brevets remonte au XV^{ème} siècle en Italie. Le premier brevet a été accordé à Filippo Brunelleschi pour une invention logistique liée au transport fluvial. Le second aurait été accordé à un assistant de Gutenberg, qui aurait ainsi acquis le droit exclusif de procéder à l'impression, en utilisant un système de caractères mobiles (Mazuir, 2009). En France, c'est le contexte de la Révolution qui a motivé l'introduction, en droit, des brevets d'invention, en 1791.

Du point de vue de l'autorité publique, le brevet est un instrument économique qui permet à la fois de gérer la question de l'appropriation, et de faciliter la diffusion des connaissances. Dans le cas présent, il constitue un arbitrage entre la nécessité pour le « producteur de connaissances » de rémunérer le risque encouru lors du processus d'innovation en captant une partie des gains associés à son usage économique et celle de faciliter un accès large et immédiat aux connaissances générées. Or, si une diffusion rapide est bénéfique du point de vue du bien-être social, elle peut se révéler nuisible pour la rentabilité privée : nul ne prendrait a-priori le risque d'investir dans la génération de nouvelles connaissances sans garanties de pouvoir privatiser, a minima, leur exploitation pour engendrer des profits ; en l'absence de droits de propriété intellectuelle, les agents économiques, par une logique anticipation de ces mécanismes, tendraient donc à éviter d'investir dans l'innovation. En d'autres termes, si, au moins, une partie du rendement lié aux nouvelles connaissances n'était pas, par principe, captée par l'innovateur initial, cela réduirait l'incitation à innover.

⁷³ Cf. Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

Le brevet revêt donc deux fonctions principales :

- Distinguer l'invention (soit le bien privé qui appartient à l'inventeur) des connaissances sous-jacentes, lesquelles demeurent un bien public. Innover consiste à mettre sur le marché des inventions issues de découvertes scientifiques : s'il n'y a pas d'innovation sans invention, il existe, en revanche, beaucoup d'inventions stériles. Une invention est le résultat d'une découverte scientifique qui peut prendre la forme d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé de production qui devient innovation dès lors qu'elle offre des applications industrielles.
- Mieux contrôler l'innovation et récupérer une partie des bénéfices liés aux investissements en R&D et aux efforts déployés par les producteurs de connaissances. Le brevet constitue, à ce titre, un actif immatériel des entreprises qui peut être utilisé pour introduire de nouveaux produits, cédé à un tiers ou donner lieu à des licences d'exploitation⁷⁴.

Certains auteurs (Foray, 2013 ; Hilaire-Pérez et al. 2013) discutent de l'efficacité du brevet en tant qu'instrument économique propice au renouvellement des innovations. Ils arguent qu'en garantissant l'exclusivité de l'invention pendant une longue période à ses propriétaires, le brevet conduit à un phénomène de rente. Dans la mesure où les droits de propriété intellectuelle protègent l'exploitation de l'invention, l'inventeur ne serait, dès lors, plus vraiment incité à innover. A contrario, dans un monde dépourvu de droits de propriété intellectuelle, le temps mis par l'imitateur à copier l'innovation garantirait à l'inventeur un avantage compétitif et des revenus optimisés sur cette période, tout en encourageant parallèlement l'inventeur à poursuivre ses efforts d'innovation pour maintenir son avantage compétitif. La position de Tesla, premier producteur de véhicules électriques mondial en 2016, s'inscrit dans cette logique : en juin 2014, Elon Musk, son fondateur, déclare que Tesla « ne poursuivra pas en justice ni les entreprises, ni les personnes qui utiliseraient ses technologies ». Ce qui signifie en filigrane que la compagnie ne considère pas ses brevets comme des barrières à l'entrée, et que ses véritables avantages stratégiques reposent sur d'autres actifs.

Un brevet est un document juridique qui détaille une série d'informations relatives à l'invention déposée, tels que le nom du déposant et de l'inventeur, la date de désignation, les classes technologiques ... Ces données représentent une source d'informations pour l'étude du développement technologique, considérée de par leur accessibilité et leur disponibilité sur de longues périodes, comme la source la plus précieuse en matière d'informations techniques et commerciales (Kuznets, 1962). Dans la mesure où la gestion des brevets mobilise de nombreuses ressources (annuité de renouvellement, conseil juridique...) pour les entreprises, ils représentent, de fait, une base fiable et couvrent potentiellement tous les domaines d'innovation, et, ce, dans la plupart des pays développés.

⁷⁴ Notons que les brevets peuvent aussi être utilisés à des fins défensives, dans le but de bloquer l'innovation des concurrents.

La méthode de dénombrement des brevets est régulièrement utilisée pour « mesurer » l'innovation et l'activité de R&D (Beneito et Pilar, 2006 ; Popp, 2002). Afin d'identifier le domaine technologique concerné par chaque brevet, les chercheurs s'appuient sur la Classification internationale des Brevets (CIB), un système hiérarchique de classement créé par l'Arrangement de Strasbourg de 1973. Si ce système est précieux pour inventorier les brevets par domaine technologique, il ne permet pas, en revanche, de distinguer si un brevet protège une innovation environnementale ou une technologie « grise ».

Pour remédier à cette carence, l'Office Mondial de la Propriété Intellectuelle (OMPI) a publié un « Inventaire vert⁷⁵ », établi par le Comité d'experts pour la Classification Internationale des Brevets sur la base d'éléments définis par la Convention-cadre des Nations-Unies sur le changement climatique. L'Inventaire vert a vocation à faciliter la recherche d'informations sur les brevets relatifs aux technologies environnementales en instituant une correspondance « intelligible » entre la classe technologique (code alpha numériques composés de 8 caractères) dans laquelle les brevets ont été déposés et le domaine environnemental de l'invention concernée.

Les données des brevets, croisées avec celles de l'Inventaire vert, départageront les brevets verts et non verts et sont régulièrement utilisées pour mener des recherches sur la transition énergétique. Par exemple, pour identifier les tendances de l'innovation environnementale en Chine, Sun et al. (2008) ont procédé à l'analyse de la distribution spatio-temporelle des brevets environnementaux. De même, Oltra et Saint Jean (2009) ont étudié les portefeuilles de brevets des principaux constructeurs automobiles dans les domaines technologiques pertinents sur une période de quinze ans pour définir les trajectoires technologiques de véhicules à basses émissions. Dechezleprêtre et Caelé (2016) se sont penchés sur l'influence du marché européen des quotas relatif au développement de technologies vertes et mis en évidence l'accroissement du nombre de brevets relatifs aux technologies bas carbone à partir de 2005.

Les brevets constituent donc une précieuse source d'informations quant aux stratégies d'innovation des électriciens. En croisant les données de la base Patstat avec la classification des brevets verts établie par l'OMPI, il devient possible de mesurer l'intensité de l'engagement des électriciens pour chacune des technologies bas carbone étudiées : smart grids, énergies renouvelables, CCS, fission nucléaire et hydrogène et, même, de disposer d'un niveau de détail à l'échelle des filières lorsque cela est pertinent (par exemple, dans le cas des énergies renouvelables, il est possible de distinguer les brevets concernant l'éolien, le photovoltaïque, les énergies des mers ...).

Cependant, l'utilisation exclusive des brevets pour mesurer l'innovation présente des limites. Parce qu'une entreprise peut privilégier une stratégie de secret à une stratégie de brevet, une politique qui fait particulièrement sens dans le cas des innovations de procédé⁷⁶ pour lesquelles la démarche de « retro engineering » est impossible. Les inventions brevetées ne débouchant pas toutes sur une mise sur le marché (Popp, 2005), les brevets ne représentent

⁷⁵ <http://www.wipo.int/classifications/ipc/fr/est/>

⁷⁶ Notons d'ailleurs que les domaines technologiques étudiés relèvent pour la plupart des innovations de procédé.

pas nécessairement un indicateur révélateur du niveau de diffusion des innovations. Sur des domaines tels que les énergies renouvelables, les politiques environnementales affectent sensiblement la direction et l'intensité des dépôts de brevets. Par exemple, le marché des quotas est susceptible d'induire un basculement des innovations de réduction des coûts vers des innovations de réductions d'émissions, ce qui conduit à compliquer l'interprétation des tendances en matière d'innovations (Popp et al 2010). Enfin, le brevet ne permet pas d'apprécier les modalités d'acquisition externe des connaissances et en particulier la démarche de co-construction de l'innovation, même si dans des cas plutôt rares, un brevet peut compter plusieurs déposants.

Pour procéder à une observation plus approfondie des modalités d'acquisition des connaissances des électriciens, l'analyse des brevets sera donc complétée par celle des projets collaboratifs. Les projets ont déjà été mobilisés notamment dans les travaux de Giordano et al. (2011), qui se proposait « d'analyser les tendances et d'anticiper les développements futurs des smart grids en Europe » via un questionnaire portant sur des aspects tels que le coût, le stade de maturité (R&D, démonstration ou déploiement) ou le segment des smart grids concerné, transmis à l'ensemble des parties prenantes susceptibles d'être engagées dans un projet.

Eu égard au rôle décisif des collaborations dans le cas présent⁷⁷, l'examen des projets collaboratifs s'impose naturellement. Une tâche complexe pour différentes raisons : les coopérations ne sont pas systématiquement rendues publiques par les entreprises, et, lorsqu'elles le sont, les informations disponibles sont, en général, parcellaires et pas forcément homogènes selon des électriciens ou les projets ; ce qui tend à affecter la robustesse des analyses et la pertinence des comparaisons.

C'est pourquoi, il semble judicieux de s'appuyer sur les projets collaboratifs conduits dans le cadre du 7^{ème} Programme Cadre pour la Recherche et le Développement (7^{ème} PCRD) sur la période 2007-2013⁷⁸. Cet instrument économique de type « technology push » doté de 50 Md€ a pour but de stimuler l'innovation en la cofinçant dans les domaines considérés comme prioritaires par la Commission européenne, au premier rang desquels les technologies bas carbone. Par ce biais, la Commission européenne contribue à répondre au problème de double externalité posé par les innovations environnementales tout en supportant, aux côtés des électriciens, une part du risque technologique.

Pour être éligibles à ce programme, les entreprises doivent se regrouper en constituant des consortiums, composés d'électriciens, de centres de recherche, d'équipementiers ou de nouveaux entrants. La liste des projets financés depuis 1990 est disponible sur la base Cordis⁷⁹, et, pour chaque projet, des informations telles que le domaine technologique

⁷⁷ Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

⁷⁸ Nous avons déjà eu l'occasion de présenter ce programme dans la section précédente. Cf. Chapitre II, section [2.1 L'intervention des autorités publiques](#).

⁷⁹ http://cordis.europa.eu/projects/home_fr.html

concerné, les participants, le coût total et le montant financé par la Commission européenne sont consultables en accès libre.

Les stratégies d'innovation des électriciens suivants : EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola, et RWE feront donc l'objet de notre analyse, fondée sur les brevets déposés par ces groupes ou leur filiale européenne, sur la période 2007-2013 et les projets collaboratifs menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD sur cette même période. Pour collecter les brevets, nous utiliserons la base Patstat de l'Office Européen des Brevets, et pour les projets, la base Cordis mise en place par la Commission européenne.

3. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

Eu égard à la spécificité de notre cadre d'analyse, il a été nécessaire de développer deux méthodologies distinctes : une première consacrée à la stratégie technologique et une seconde dédiée à la stratégie d'acquisition des connaissances. Toutes deux s'appuieront sur les données fournies par les bases Patstat et Cordis, données qu'il est néanmoins préalablement nécessaire de retraiter selon les processus détaillés ci-dessous.

3.1 RETRAITEMENT DES DONNEES

Retraiter les données des brevets et des projets collaboratifs issus du 7^{ème} PCRD a été une étape indispensable pour pouvoir les intégrer à la méthodologie d'analyse des stratégies d'innovation définie conceptuellement. Selon un processus différent, en fonction de la source exploitée : d'abord, le retraitement des projets qui passe par la constitution de deux bases, membres et projets, puis, celui des brevets qui nécessitent, en croisant la base Patstat et l'Inventaire vert de l'OMPI, d'être classifiés en fonction des technologies concernées.

3.1.1 Retraitement des projets collaboratifs

Le retraitement des projets collaboratifs comprend plusieurs étapes : dans un premier temps, la constitution d'une base « Projets » et d'une base « Membres » établie d'après les sources de la base Cordis librement accessible en ligne. Cordis regroupe l'ensemble des projets financés par l'Union européenne depuis 1990 et fournit, pour chacun d'entre eux, un certain nombre de renseignements, tels que le nom des partenaires, les objectifs du projet, le coût global, le montant financé par l'UE, les livrables, le site web du projet lorsqu'il existe, la date de début et de fin du projet...⁸⁰

La constitution de la base « Projets » se décompose en plusieurs phases. Tout d'abord, déterminer les filiales des électriciens associées à au moins un projet européen à l'occasion du 7^{ème} PCRD⁸¹. Ensuite, collecter, pour chacun de ces acteurs, les projets auxquels ils sont associés ainsi que les informations suivantes : coût total du projet, montant de la contribution de l'Union européenne, nom du coordinateur du consortium, objectifs, site web. Enfin, caractériser spécifiquement chaque projet en fonction du domaine technologique concerné (avec l'aide, si nécessaire, du complément d'informations fourni en fonction de l'objectif du

⁸⁰ Cf. [Annexe 3 : Présentation du projet Advanced dans la base Cordis](#).

⁸¹ Sont exclues de ce périmètre, les entreprises rachetées ou qui ont fait l'objet de prise de participation par les électriciens retenus tels que par exemple Endesa (dans laquelle Enel a pris des participations) ou Electrabel (rachetée par Engie). Cf. [Annexe 4 Liste des filiales des électriciens à partir desquelles les projets ont été collectés](#).

projet et via site web). Rappelons que les domaines technologiques retenus⁸² sont les suivants : énergies renouvelables, fission nucléaire, captage et stockage du carbone, hydrogène et smart grids, et que les projets ne relevant pas de l'un de ces domaines sont donc classés dans la catégorie « Divers »⁸³. Afin de refléter la diversité des énergies renouvelables et des smart grids, nous réalisons une subdivision supplémentaire de ces deux domaines par sujets, selon la segmentation proposée à la figure 24.

Figure 24 : Segmentation des smart grids et des énergies renouvelables

Energies renouvelables	Smart grids
Divers	Compteurs intelligents
Energie des mers	Expérimentation globale
Eolien ⁸⁴	Gestion bas carbone des bâtiments
Solaire ⁸⁵	Gestion IT de la demande
	Réseau et intégration des EnR
	Stockage
	Véhicule électrique

Source : auteur

Enfin, il nous a fallu agréger pour chaque électricien, l'ensemble des projets réalisés par ses filiales. Cette nouvelle classification constitue une base à partir de laquelle il sera possible d'identifier pour chacun des électriciens étudiés les projets auxquels ils participent, ainsi qu'un certain nombre d'informations financières (coût total du projet, financement de la Commission européenne) et technologiques.

La base « Membres » recense, pour chacun des projets, l'ensemble des partenaires du consortium. Chacun de ses membres est classifié en tant qu'« Acteur historique de l'énergie » ou « Nouvel entrant ». Les nouveaux entrants se répartissent entre entreprises créées depuis moins de dix ans, et adjacents, c'est-à-dire des entreprises déjà établies dans un domaine autre mais qui profitent de la transition énergétique pour développer leur technologie dans le domaine de l'électricité⁸⁶. Par exemple, les acteurs des NTIC et ceux de l'automobile sont compris comme des adjacents au regard du rôle qu'ils sont amenés à jouer dans le domaine des smart grids et des véhicules électriques. Pour parvenir à la qualification la plus précise

⁸² Cf. Chapitre I, section [2.2.2 Focus sur cinq domaines technologiques bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique](#).

⁸³ Les projets Divers relèvent de technologies bas carbone non incluses dans le périmètre des domaines technologiques retenus (par exemple, cogénération), de technologies environnementales non énergétiques (gestion de l'eau), ou encore de technologies non environnementales (sécurité, résistance des matériaux).

⁸⁴ Incluant éolien onshore et éolien offshore.

⁸⁵ Incluant solaire photovoltaïque et solaire CSP.

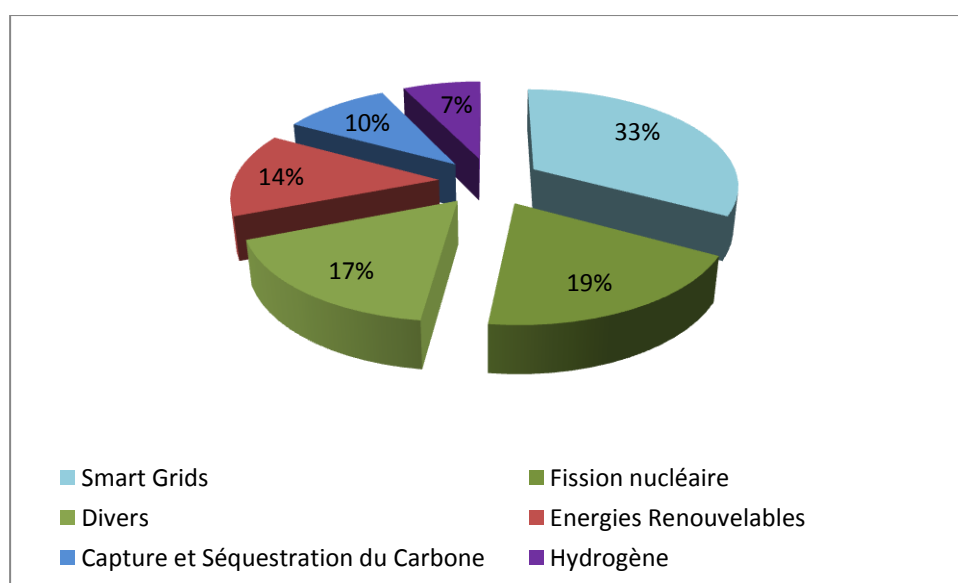
⁸⁶ Nous avons également inclus dans la catégorie des nouveaux entrants, les centres de recherche non exclusivement dédiés à la question de l'énergie.

possible de chacun des membres, nous avons eu recours aux informations communiquées par leur site internet et leur rapport d'activité, lorsque celui-ci était disponible.

Quelques remarques préliminaires, d'ordre général, tirées des statistiques de la base « Projet » ainsi constituée :

A l'occasion du 7^{ème} PCRD, les six électriciens retenus dans le périmètre d'analyse ont participé à 152 projets. Parmi ces projets, 26 ressortent de la catégorie Divers. Si ces projets sont exclus du périmètre d'analyse concentré sur la fission nucléaire, le CCS, l'hydrogène, les smart grids et les énergies renouvelables, nous avons pris le parti de présenter, toutefois, les statistiques s'y rapportant.

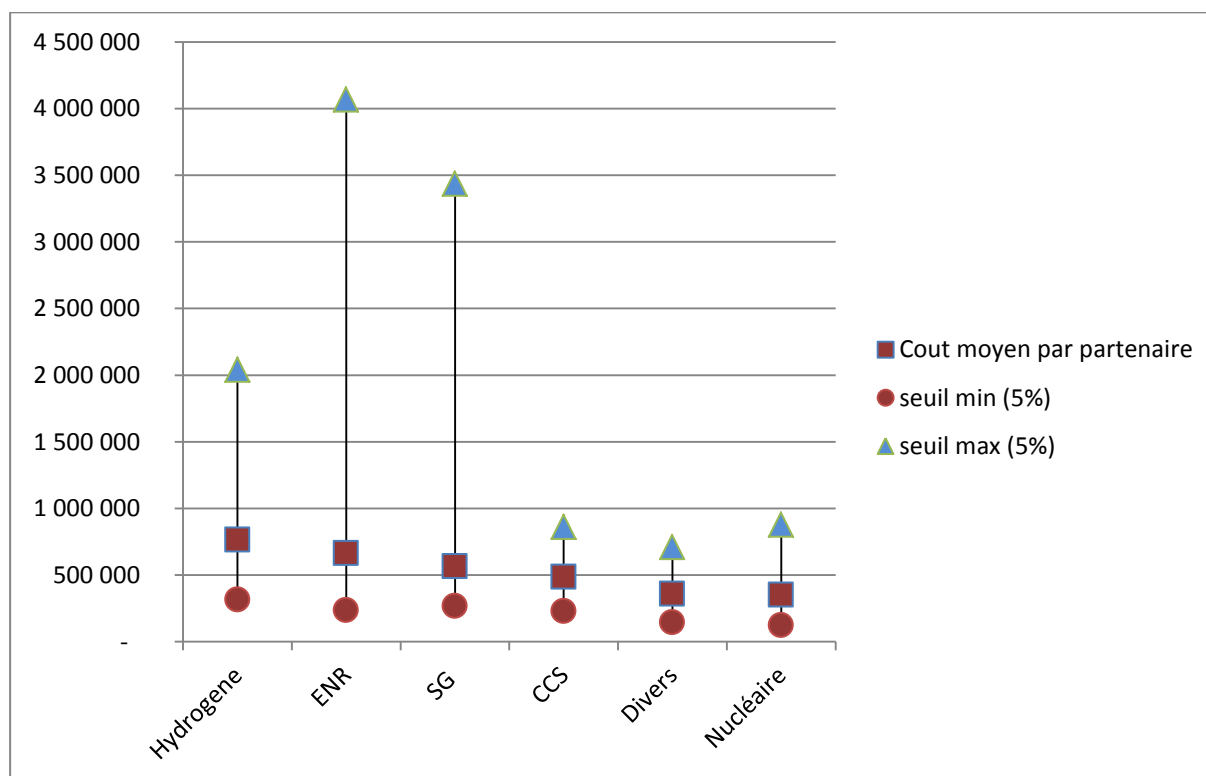
Figure 25 : Répartition du nombre des projets par domaine technologique



Source : auteur, à partir de la base Cordis

Le coût moyen d'un projet par partenaire est de 665 000 €. L'hydrogène et les énergies renouvelables sont les domaines au coût moyen par partenaire le plus élevé (respectivement 766 000 € et 665 000 €) tandis que la fission nucléaire et les projets divers sont ceux au coût moyen par partenaire le plus faible (respectivement 353 000 € et 360 000€). Notons que les énergies renouvelables et les smart grids se distinguent des autres domaines par un seuil maximum particulièrement élevé.

Figure 26 : Classement des domaines technologiques en fonction du coût moyen par partenaire

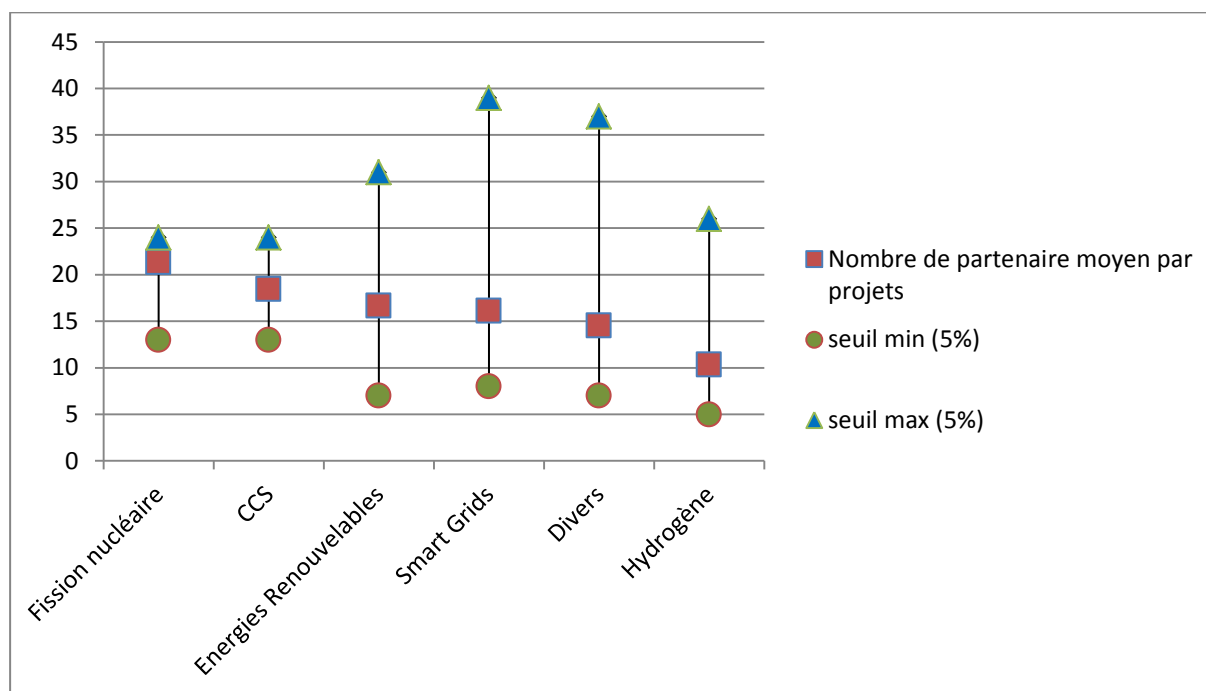


Source : auteur, à partir de la base Cordis

On constate que le nombre moyen de partenaires par projet varie du simple au double en fonction du domaine technologique concerné. Ainsi, en moyenne, 21,3 partenaires sont associés aux projets de fission nucléaire contre seulement 10,3 dans le cas de l'hydrogène. On observe également que la fission nucléaire et le CCS, qui font l'objet du plus grand nombre de partenaires moyen par projet, sont les domaines pour lesquels le seuil minimum⁸⁷ est le plus élevé. A l'inverse, il est intéressant de constater que les domaines divers et smart grids disposent du seuil maximum le plus élevé, et, ce, bien qu'ils disposent d'un nombre moyen de partenaires par projet plus faible que la plupart des domaines considérés.

⁸⁷ Le seuil minimum correspond au seuil en deçà duquel le coût total des projets représente 5% du coût total des projets.

Figure 27 : Classement des domaines technologiques en fonction du nombre moyen de partenaires par projet

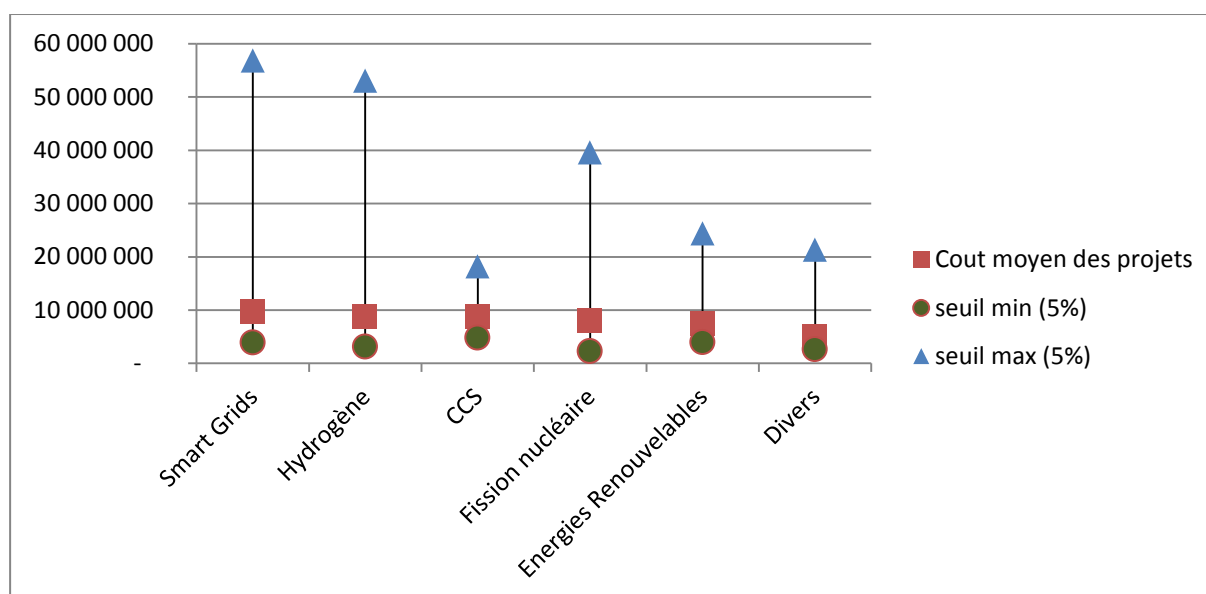


Source : auteur, à partir de la base Cordis

L'ensemble des projets fait état d'un coût total de 1 227 M€. Le coût moyen d'un projet est de 8 M€ mais varie selon les domaines, de 5 M€ pour la catégorie divers à 9,6 M€ pour les smart grids. Notons, en outre, que la dispersion du coût des projets est très différente d'un domaine technologique à l'autre. Ainsi, on observe que les domaines aux coûts les plus élevés (smart grids et hydrogène) sont également ceux pour lesquels le seuil maximum⁸⁸ est le plus élevé. Cela tendrait à signifier que dans ces domaines, un nombre limité de projets auraient un coût singulièrement plus élevé que les autres. Par exemple, dans le cas de l'hydrogène, un seul projet représente à lui seul plus de 50% du coût total. A l'opposé, on observe que dans le cas du CCS, le coût des projets les plus élevés et les moins élevés est particulièrement homogène, gravitant autour de la moyenne.

⁸⁸ Le seuil maximum correspond au seuil à partir duquel les projets représentent 95% du coût total des projets.

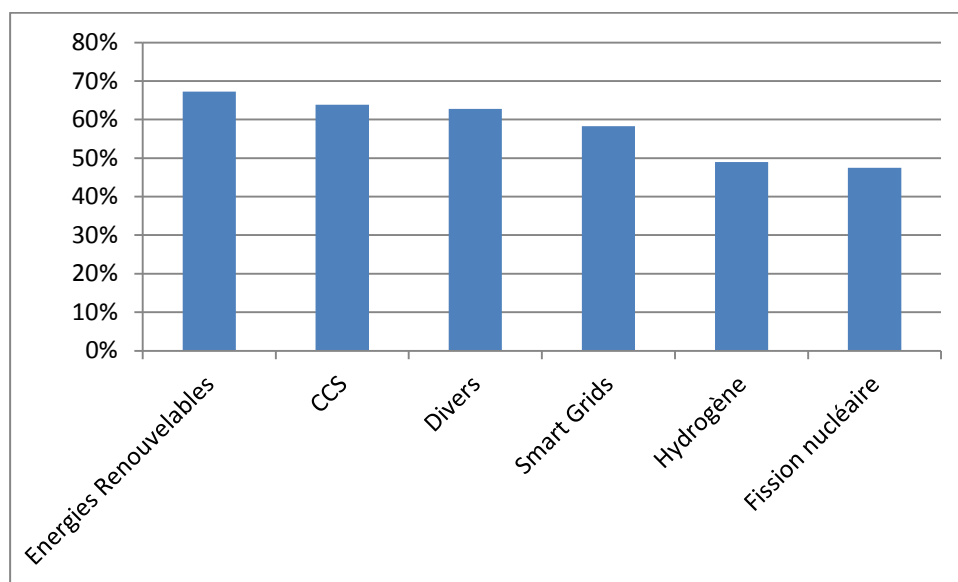
Figure 28 : Classement des domaines en fonction du coût moyen des projets



Source : auteur, à partir de la base Cordis

Il est intéressant de constater que le taux de financement de l'Union européenne varie de plus de 40%, entre les énergies renouvelables bénéficiant du taux de soutien le plus élevé (67%) et la fission nucléaire, du plus faible (47%). Nous reviendrons dans la section dédiée aux études de cas⁸⁹ sur les raisons de ces écarts.

Figure 29 : Taux de financement de l'Union européenne par domaine technologique.



Source : auteur, à partir de la base Cordis

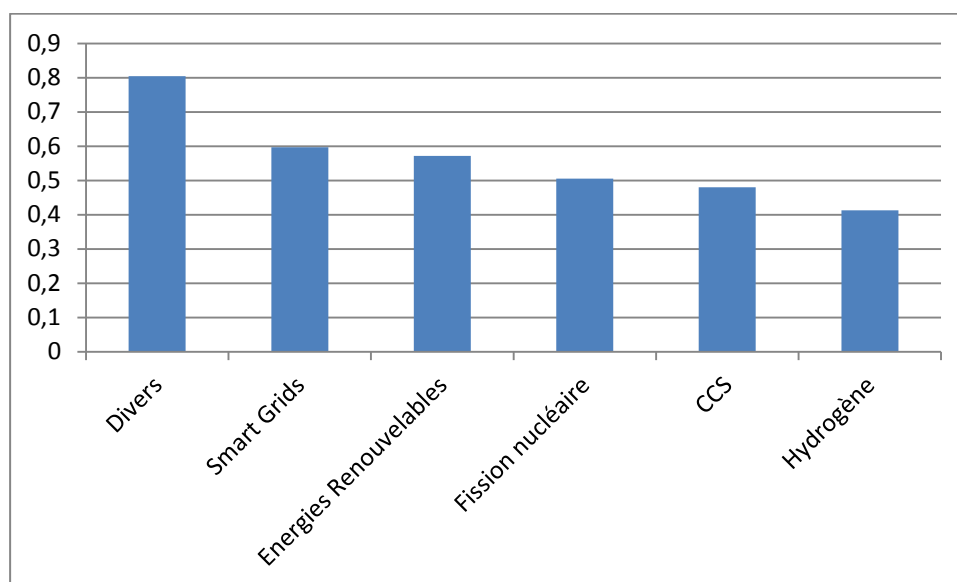
Quelques remarques tirées d'un examen global de la base « Membres », ensuite.

Les 152 projets associent au total 2 545 partenaires représentant 1 293 organisations différentes. On peut noter que les 50 organisations les plus actives (soit 4% des organisations)

⁸⁹ Cf. Chapitre IV, section [2. Analyse des domaines technologiques](#).

représentent 27% des participants aux projets, et participent, en moyenne, chacune à 14 projets. A l'inverse, on remarquera que 934 organisations participent seulement à un unique projet. Par ailleurs, on constate que les projets associent en moyenne 58% de nouveaux entrants contre 42% d'acteurs historiques. Enfin, il ressort de ce premier aperçu que les nouveaux entrants représentent des parts sensiblement inégales en fonction des domaines, allant de 80% dans le cas de la catégorie Divers à seulement 41% pour l'hydrogène.

Figure 30 : Part des nouveaux entrants pour chacun des domaines technologiques étudiés



Source : auteur, à partir de la base Cordis

3.1.2 Retraitement des brevets

La base « Brevets » a été constituée à partir des données Patstat selon le processus suivant. Nous avons relevé, à partir du nom des électriciens et de leurs filiales⁹⁰ l'ensemble des brevets déposés par ces derniers entre 2007 et 2013, ainsi que leur classe technologique. Un même brevet fait l'objet de plusieurs lignes s'il a été déposé dans plusieurs classes technologiques. Dans ce cas-là, la technique dite de « comptage fractionnaire » (OCDE, 1994) permet d'éviter les doublons : il s'agit, alors, d'attribuer une fraction égale au nombre de classes technologiques concernées par ledit brevet. L'idée est de se concentrer sur les brevets déposés plutôt que sur ceux attribués pour « capturer » l'intention des électriciens, afin de distinguer, le plus précisément possible, les domaines technologiques sur lesquels ils s'engagent, sans que ceux-ci puissent pour autant faire l'objet d'une nouvelle invention. Il est donc important, à cet effet, de tenir compte de la date de priorité, et non de la date d'octroi du brevet. Puis, de

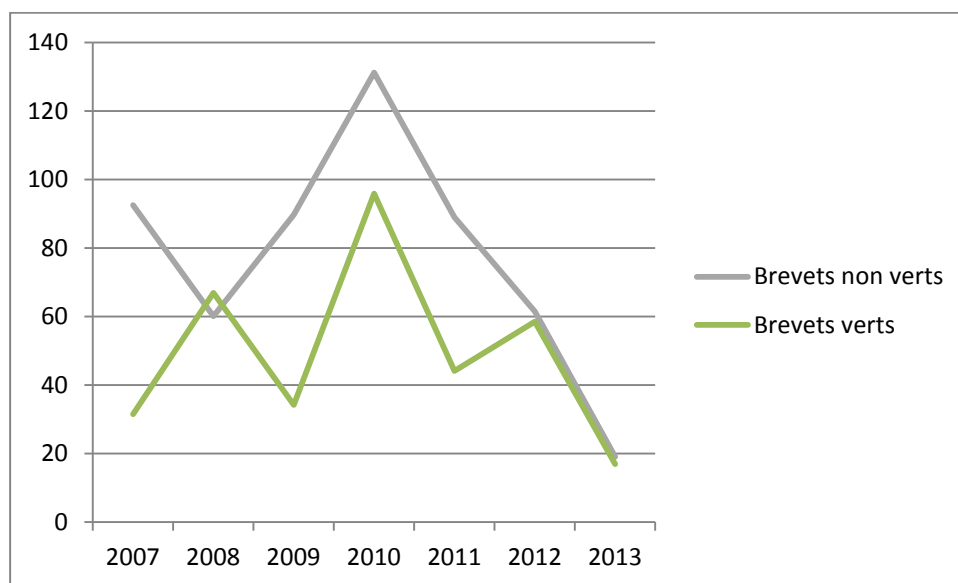
⁹⁰ Cf. [Annexe 5 : Liste des déposants à partir desquels les brevets ont été collectés](#). De même à la démarche mobilisée pour les projets, nous ne collectons pas les brevets déposés par les entreprises rachetées ou dans lesquelles les électriciens ont des participations.

croiser la classe technologique avec l'Inventaire vert de l'OMPI⁹¹ pour les départager et identifier les brevets verts déposés dans les domaines étudiés.

Quelques statistiques générales tirées de la base « Brevets » ainsi constituée.

Sur la période 2007-2013, 891 brevets ont été déposés par les cinq électriciens étudiés dont 543 verts et 348 non verts (c'est-à-dire relevant de classes technologiques ne figurant pas dans l'Inventaire vert de l'OMPI). On constate qu'à partir de 2009, les dépôts respectifs des brevets verts et non verts s'inscrivent dans une tendance assez proche.

Figure 31 : Evolution de l'ensemble des brevets verts et non verts déposés par EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE entre 2007 et 2013

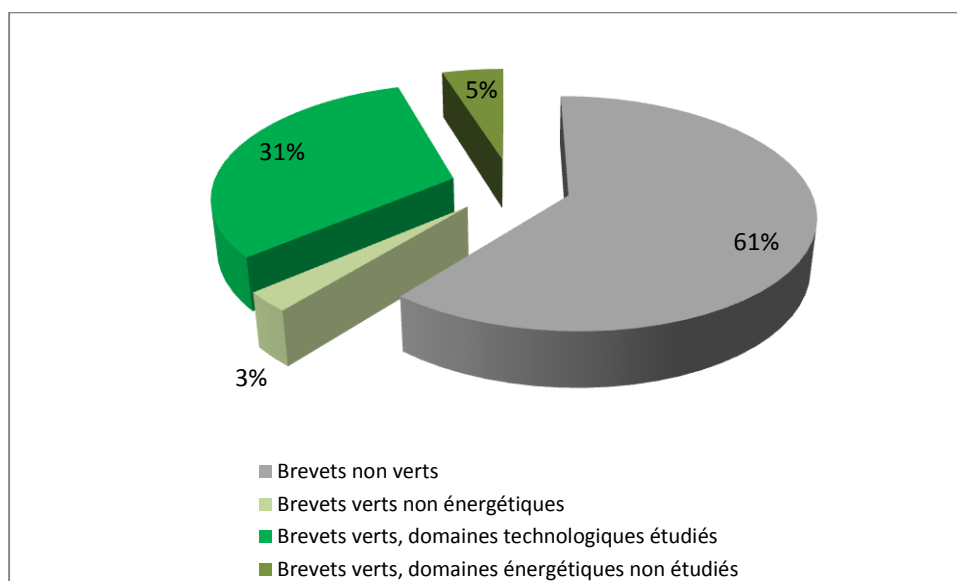


Source : auteur à partir de la base Patstat

La majorité des brevets déposés par les électriciens sont des brevets non verts. On peut raisonnablement supposer qu'ils concernent des technologies « grises », c'est-à-dire des technologies à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre ; sans certitude toutefois, car des brevets non énergétiques ont également pu être déposés par les électriciens. Notre étude portera sur 280 brevets, soit 31% des brevets déposés sur la période 2007-2013 par les six électriciens étudiés.

⁹¹ Cf. Chapitre III, section [2.2 Le choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxys de l'innovation.](#)

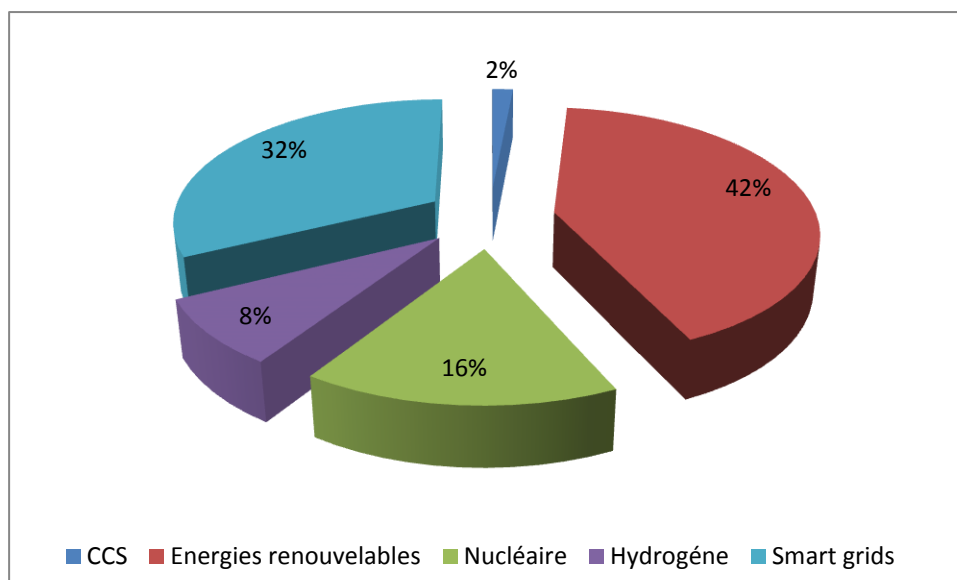
Figure 32 : Répartition de l'ensemble des brevets verts et non verts déposés par EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE entre 2007 et 2013



Source : auteur à partir de la base Patstat

La segmentation des brevets en fonction des domaines technologiques se distingue par sa forte hétérogénéité : le domaine des énergies renouvelables concerne 42% des brevets tandis que celui du CCS seulement 2%.

Figure 33 : Répartition des brevets déposés EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE entre 2007 et 2013 en fonction des domaines technologiques étudiés



Source : auteur à partir de la base Patstat

3.1.2 MODALITE D'ANALYSE DE LA STRATEGIE TECHNOLOGIQUE DES ELECTRICIENS ET DU SECTEUR

La méthodologie pour quantifier l'intensité de l'engagement sur un domaine technologique ou un groupe de domaines technologiques est la même, que l'on raisonne pour un électricien ou un ensemble d'électriciens⁹². La difficulté de cet exercice consiste à mesurer une intensité selon un indicateur « uni-dimensionnel », alors que nous partons du principe d'aborder les domaines technologiques selon une approche multi-dimensionnelle, fondée à la fois sur les brevets et les projets.

Afin de résoudre cette problématique, nous proposons une représentation graphique de la part des brevets et des projets sur une technologie donnée, valable pour un électricien ou un ensemble d'électriciens.

Il est important de noter que le calcul des parts de projets pour une technologie donnée s'opère à partir du rapport entre le nombre de projets réalisés dans un domaine défini et le nombre total de projets. Le parti pris de calculer en fonction du nombre de projets et non de leur coût découle de plusieurs facteurs. Tous les domaines ne sont pas intensifs en capital dans les mêmes proportions : un investissement plus élevé dans un domaine technologique n'est pas nécessairement significatif de son niveau de priorité. Par ailleurs, la base Cordis renseigne le coût total du projet et le nombre de participants, mais ne divulgue pas d'informations détaillées sur le coût du projet pour chacun d'entre eux. Au regard de la variété des participants (institutions académiques, électriciens, fournisseurs, ...) qui apportent des contributions hétérogènes, il serait donc impropre de rapporter le coût du projet à leur nombre pour estimer le budget mobilisé par chacun et de déduire de ce procédé, celui des électriciens. En outre, privilégier une approche par le nombre plutôt que par le coût permet d'éviter les erreurs d'interprétation. Par exemple, dans le cas où une technologie serait "prioritaire" pour un électricien, celui-ci pourrait se manifester seulement dans un nombre restreint de projets - mais au budget significatif - alors même que, pour des technologies qui lui seraient secondaires, il ne conduirait que de "petits" projets. Or, ce n'est pas en participant à peu de projets (et peu importe leur coût), et n'adressant qu'un nombre limité d'enjeux, qu'un électricien maîtrisera un domaine technologique. En revanche, multiplier les projets lui permettra de s'impliquer dans un vaste échantillonnage d'objectifs scientifiques, technologiques et économiques et d'acquérir des connaissances diversifiées sur le secteur considéré.

Pour calculer les parts de brevets, nous avons choisi de réaliser un comptage par domaine technologique en nous appuyant sur celui (OCDE, 1994) présenté précédemment⁹³. Dans la mesure où l'objet de ce travail de recherche ne concerne pas spécifiquement une étude

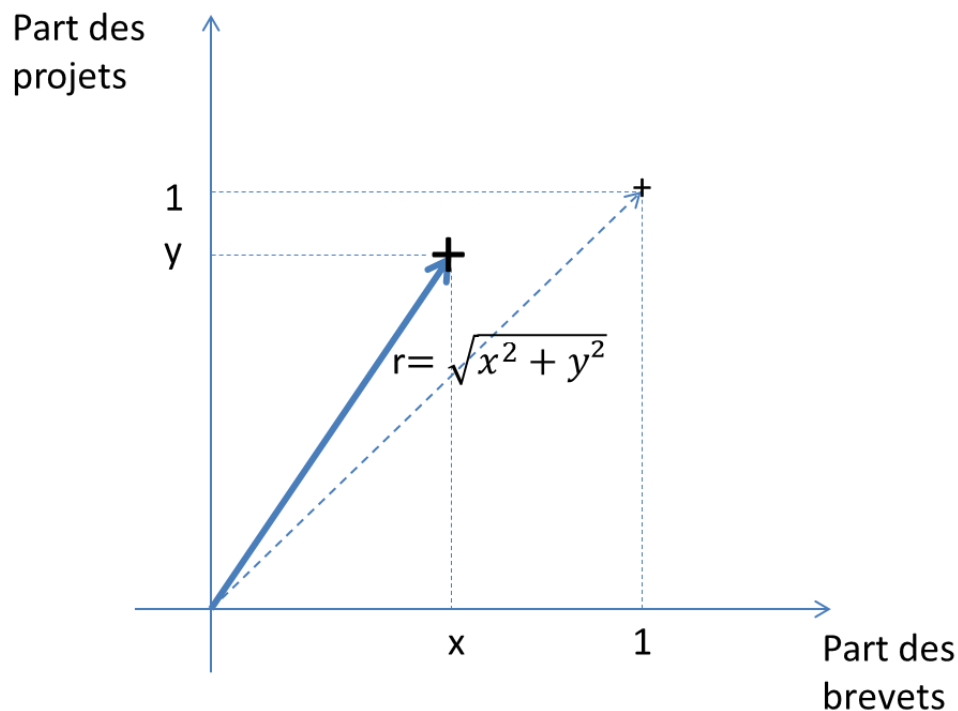
⁹² Dans les prochains chapitres consacrés aux études de cas, nous serons notamment amenés à mesurer l'intensité de l'engagement, d'une part, pour l'ensemble des technologies d'addition et de substitution (ce qui passe par l'agrégation des domaines concernés) et d'autre part, pour l'ensemble des électriciens, dans le but d'analyser la stratégie à l'échelle du secteur électrique.

⁹³ Cf. Chapitre III, section [3.1.2 Retraitement des brevets](#)

approfondie des brevets mais vise plus globalement à analyser les stratégies d'innovation des électriciens, nous nous sommes abstenus de sophistiquer le comptage en pondérant, par exemple, par le nombre de citations (forward ou backward), les revendications ou les familles de brevets.

Afin de faciliter l'explication de notre démarche, nous représentons sur la figure 34, en abscisse la part des brevets (x) et en ordonnée la part de projets (y) pour un domaine technologique donné.

Figure 34 : Calcul de l'intensité de l'engagement d'un électricien dans un domaine technologique donné



Source : auteur

L'intensité de l'engagement est caractérisée par le rayon r . Afin de disposer d'une mesure comprise dans l'intervalle $[0,1]$, il a été nécessaire de normaliser l'intensité en tenant compte de la valeur maximum possible du rayon obtenu dans le cas où le domaine technologique considéré concentrerait 100% des brevets et 100% des projets. Dans ce cas, la valeur maximum du rayon serait égale à $\sqrt{2}$.

L'intensité $r_{normalisé}$ est donc définie comme :

$$r_{normalisé} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{2}}$$

Cette intensité peut être calculée pour un domaine technologique spécifique ou pour un ensemble de technologies (en particulier, l'ensemble des technologies relevant de l'addition ou de la substitution). Dans ce cas, x représente la part des brevets spécifique de l'ensemble des technologies et y la part des brevets de l'ensemble des technologies.

Dans les études de cas, cette approche quantitative permettra de comparer les domaines technologiques (ou les ensembles de domaines) entre eux. Nous accorderons donc plus d'importance au niveau relatif de l'intensité de chacun des domaines qu'à leur niveau absolu. Cette démarche quantitative sera complétée par une analyse qualitative des domaines technologiques pour tenter d'expliquer les différents niveaux d'intensité observés.

3.1.2 MODALITE D'ANALYSE DE LA STRATEGIE D'ACQUISITION DES CONNAISSANCES DES ELECTRICIENS ET DU SECTEUR

Pour caractériser le niveau d'ouverture de la stratégie d'acquisition des connaissances, nous calculons puis agrégeons trois indicateurs par une moyenne arithmétique non pondérée. Pour cela, nous devons neutraliser les unités des indicateurs en les ramenant à des ratios dépourvus d'unité. Nous retenons les trois indicateurs mis en évidence dans le cadre d'analyse⁹⁴ : « Coopétition », « Nouveaux entrants », « Co-construction de l'innovation » et les présentons ici par niveau de complexité croissant.

Premièrement, l'indicateur « Coopétition » vise à mesurer, sur un domaine technologique donné, l'intensité de la collaboration d'un électricien (ou d'un ensemble d'électriciens) avec les autres électriciens dans le but de mutualiser l'effort et de partager les connaissances.

Pour calculer cet indicateur, nous rapportons pour un électricien donné le nombre de projets associant, au moins, un autre électricien du périmètre d'analyse⁹⁵ à l'ensemble des projets d'un domaine technologique ou d'un ensemble de domaines technologiques. S'agissant d'une proportion, l'indicateur « Coopétition » est compris dans l'intervalle [0,1].

Deuxièmement, l'indicateur « Nouveaux entrants » vise à déterminer la part de projets associant significativement plus de nouveaux entrants que les autres projets par un électricien (ou un ensemble d'électriciens) et pour un domaine technologique (ou un ensemble de domaines) donné.

La méthodologie appuyée sur la base « Membres », qui a établi la classification des participants à l'ensemble des projets en tant que nouveaux entrants (jeunes entreprises ou adjacents) ou acteurs historiques de l'énergie⁹⁶ s'articule autour des étapes suivantes.

Etape 1 : Qualification des projets selon la distinction « Nouveaux entrants » vs « Acteurs historiques » : Pour chacun des projets, nous chercherons à identifier s'il s'agit d'un projet

⁹⁴ Cf. Chapitre III, section [1.Délimitation d'un cadre d'analyse.](#)

⁹⁵ Bien que les projets analysés puissent faire l'objet d'une participation d'électriciens non retenus dans notre périmètre d'analyse, nous avons décidé de retenir exclusivement les collaborations entre électriciens du périmètre dans le but de ne pas biaiser les résultats. Dans la mesure où les électriciens retenus sont les principaux acteurs européens, ils connaissent, entre eux, une compétition internationale ce qui n'est pas forcément le cas avec les autres électriciens dont l'activité est moins internationale. Dans ce cas précis, la coopération ne pourrait pas être interprétée comme un cas de coopération.

⁹⁶ Cf Chapitre III, section [3.1.2 Retraitement des brevets.](#)

orienté « Nouveaux entrants », ou orienté « Acteurs historiques ». Un projet sera qualifié d'orienté « Nouveaux entrants », s'il est composé de significativement plus de jeunes entreprises ou d'adjacents que l'ensemble des autres projets. De même, un projet sera considéré orienté « Acteurs historiques », s'il associe significativement plus d'acteurs orientés « Acteurs historiques » que l'ensemble des autres projets.

Afin de qualifier les projets, nous allons tester deux hypothèses :

Tout d'abord, nous testerons l'hypothèse de travail $H0$ suivante : « la proportion de membres orientés « Nouveaux entrants » dans le projet Pi n'est pas significativement différente que dans tous les autres projets ». Pour tester cette hypothèse, nous considérons que sous $H0$, la qualification du membre m d'un projet i comme membre orienté « Nouveaux entrants » (codé $X_m = 1$) *versus* « Acteurs historiques » (codé $X_m = 0$) est tirée au hasard selon une loi de Bernoulli dont la probabilité de réalisation de la valeur 1 est fixée au niveau de la proportion θ_i^{autres} de membres « Nouveaux entrants » observée sur l'ensemble $\bar{\Omega}_m^i$ des autres projets:

$$X_m = \begin{cases} 1 & \text{avec proba } \theta_i^{autres} \\ 0 & \text{avec proba } 1 - \theta_i^{autres} \end{cases}$$

Avec

$$\theta_i^{autres} = \sum_{m' \in \bar{\Omega}_m^i} X_{m'}$$

Nous allons simuler le tirage de N membres (mêmes effectifs que dans le projet Pi). Le nombre de membres « Nouveaux entrants » suit une loi binomiale $B(Ni, \theta_i^{autres})$. Dans ces conditions, la probabilité Pr_{Techno} que la proportion de projets « Nouveaux entrants » soit tirée se calcule via la formule suivante :

$$\begin{aligned} Pr_{Techno} &= P(\theta_i = \frac{n}{Ni} / H0) \text{ Probabilité conditionnellement à l'hypothèse } H0 \\ &= \frac{Ni!}{(n! (Ni - n)!)} \cdot \theta_i^{autres^n} \cdot \theta_i^{autres^{(n-Ni)}} \end{aligned}$$

Avec :

$n \in \{0, \dots, Ni\}$: le nombre de tirages dont les membres sont orientés « Nouveaux entrants »,

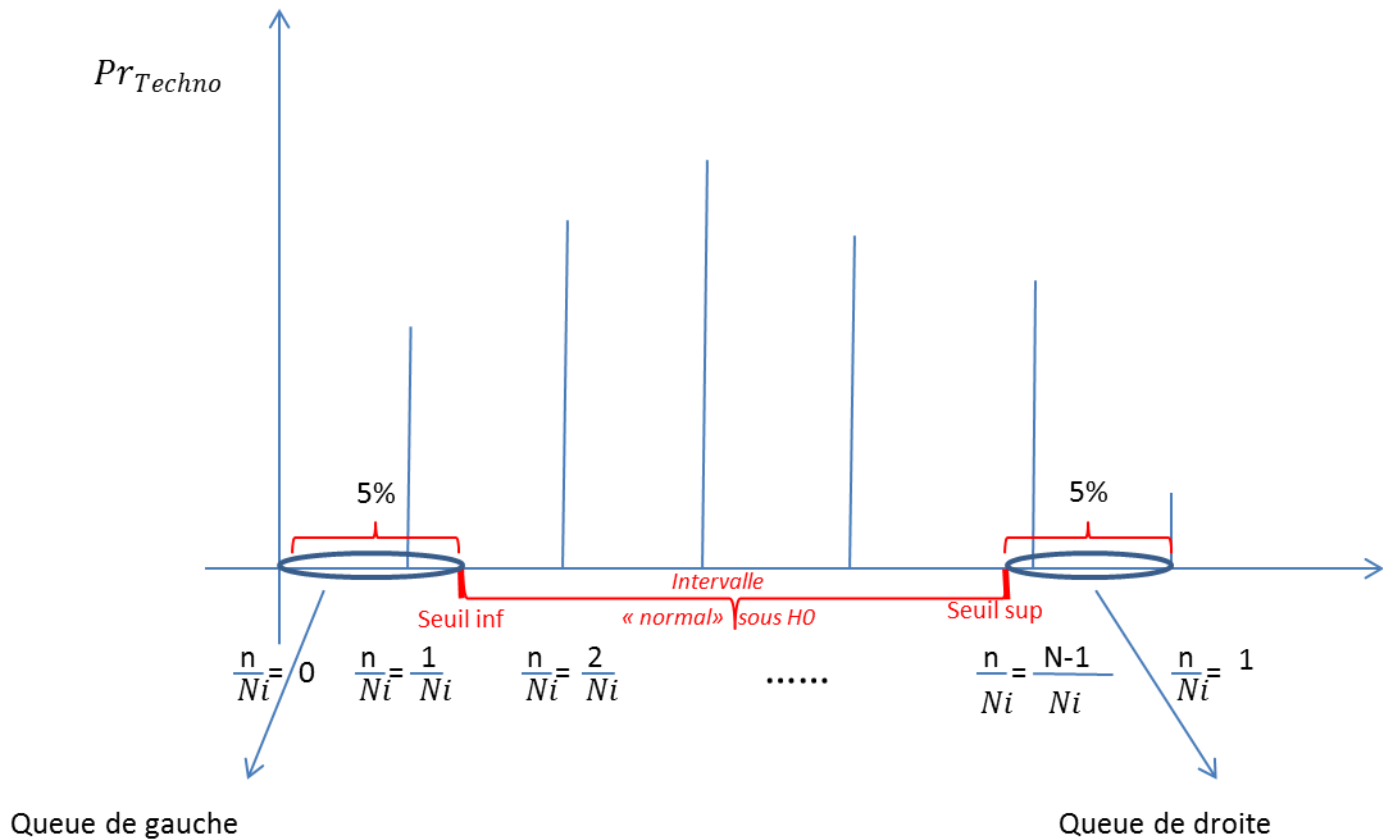
$Ni - n$: le nombre de tirages dont les membres ne sont pas « Nouveaux entrants »,

Ni : le nombre total de membres du projet Pi .

Une fois que la distribution de la proportion de membres « Nouveaux entrants » des projets sous l'hypothèse $H0$ a été construite, nous identifions la borne inférieure et la borne supérieure (cf Figure 34) délimitant les deux queues de la distribution. Chaque queue de distribution est définie comme regroupant les 5% de valeur extrêmes de la distribution. Ce critère de 5% est fixé sur la base du risque d'erreur le plus couramment retenu dans les tests

statistiques. La queue de distribution « de gauche » associée à des proportions représente une proportion anormalement faible de membres orientés « Nouveaux entrants ». Elle est séparée du reste de la distribution par un seuil de proportion noté *seuil inf*. Symétriquement, la queue de distribution « de droite » représente une proportion anormalement élevée de membres orientés « Nouveaux entrants » sous H_0 . Elle est séparée du reste de la distribution par un seuil de proportion noté *seuil sup*.

Figure 34 : Distribution de probabilité d'un tirage suivant une loi de Bernoulli



Source : auteur

Par la suite, nous allons comparer la position de la proportion calculée de membres « Nouveaux entrants » au sein du projet P_i vis-à-vis du seuil supérieur. Deux cas sont possibles :

Si la proportion calculée est supérieure au seuil sup, nous concluons avec un risque d'erreur de 5% que le projet P_i dispose d'une part anormalement élevée de membres orientés « Nouveaux entrants ». Dans ce cas, H_0 est rejetée avec un risque d'erreur de 5%. La proportion de membres orientés « Nouveaux entrants » est significativement plus forte que sur l'ensemble des autres projets. On peut donc qualifier le projet d'orienté « Nouveaux entrants ».

Si en revanche, la proportion n'est pas supérieure à seuil sup. Dans ce cas, il n'est pas possible de conclure car nous ne pouvons pas discriminer entre un projet orienté « Acteurs historiques » ou « Equilibré » (les projets Equilibrés sont les projets qui n'associent ni une

part significativement supérieur de « Nouveaux entrants », ni une part significativement supérieurs d'« Acteurs historiques »).

Afin de pouvoir identifier si le projet P_i est orienté « Acteurs historiques », nous allons tester l'hypothèse de travail H_0 suivante : la proportion de membres « Acteurs historiques » dans le projet P_i n'est pas significativement différente des autres projets.

En suivant la même méthodologie que précédemment, nous simulons la distribution des proportions. Cela conduit, comme précédemment à identifier la borne inférieure et la borne supérieure pour les seuils exogènes de 5% associés au 5% de valeurs extrêmes.

Si la proportion est supérieure au seuil supérieur, le projet P_i dispose d'une part anormalement élevée de membres orientés « Acteurs historiques » sous H_0 . Dans ce cas H_0 est rejetée. La proportion de membres orientés « Acteurs historiques » est significativement plus forte que sur l'ensemble des autres projets. Nous pouvons donc qualifier le projet d'orienté « Acteurs historiques ».

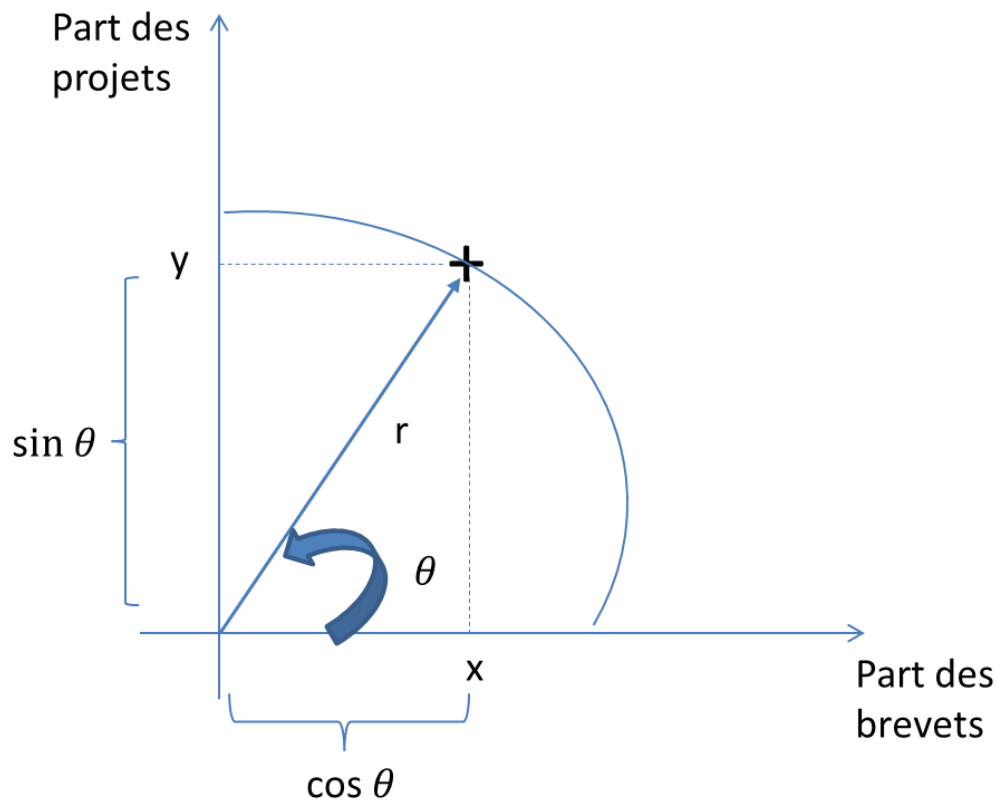
Si à l'issue de ces tests, le projet n'est ni qualifié orienté « Acteurs historiques » ni orienté « Nouveaux entrants », alors nous considérons, par déduction, qu'il est « Équilibré ».

A travers cette méthodologie, chaque projet est donc systématiquement qualifié selon qu'il soit « Équilibré », orienté « Nouveaux entrants » ou orienté « Acteurs historiques ». Il est donc possible de calculer, pour un électricien donné (ou un ensemble d'électriciens), un domaine technologique donné (ou un ensemble de domaines technologiques), la part des projets orientés « Nouveaux entrants », en rapportant le nombre de projets aux projets totaux.

Troisièmement, nous retiendrons l'indicateur « Co-construction de l'innovation ». Cet indicateur permet d'apprécier la propension d'un électricien (ou d'un ensemble d'électriciens) à développer de l'innovation avec son écosystème par rapport à l'innovation qu'il génère en interne. Pour calculer cet indicateur, nous nous basons sur l'importance relative des projets par rapport aux brevets pour un domaine technologique (ou un ensemble de domaines).

La difficulté de calcul de cet indicateur tient au fait qu'il n'est pas possible de simplement calculer le rapport entre la part des projets et la part des brevets, car l'une de ces proportions pourrait être nulle, ce qui empêcherait le calcul de l'indicateur. Pour contourner cette difficulté, nous allons calculer la valeur de l'angle θ formée par le rayon à partir de l'axe horizontal. Pour faciliter la compréhension de la méthodologie, nous présentons ci-dessous la représentation graphique à la figure 35.

Figure 35 : Calcul de l'indicateur de Co-construction de l'innovation d'un électricien dans un domaine technologique donné



Source : auteur

En connaissant x la part des brevets et y la part des projets, nous pouvons déduire l'angle en radian θ .

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

Avec

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Par construction, cet angle prend des valeurs comprises dans l'intervalle $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. Afin de disposer d'un indicateur compris dans l'intervalle $[0, 1]$, nous le normalisons en le rapportant à $\frac{\pi}{2}$. Lorsque cet indicateur est proche de 1, cela signifie que l'électricien privilégie la co-construction de l'innovation par rapport à la génération interne de l'innovation ; et inversement, lorsqu'il est proche de zéro, cela signifie que l'électricien privilégie un processus d'innovation s'appuyant sur les capacités internes plutôt que sur un processus de co-construction avec son environnement. Lorsque l'indicateur est proche du seuil de 0,5, l'électricien présente une stratégie équilibrée.

Nous disposons ainsi de trois indicateurs calculés selon une approche quantitative. La moyenne de ces indicateurs permet d'apprécier le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des nouvelles connaissances. Dans les études de cas, cette approche quantitative permettra de comparer les différents domaines technologiques (ou les ensembles de domaines) et les électriciens (ou les ensembles d'électriciens) entre eux. Nous accorderons donc plus d'importance au niveau relatif de chacun des trois indicateurs d'ouverture et de l'indicateur de synthèse qu'à leur niveau absolu. Nous mobiliserons de surcroît une approche qualitative afin de mieux comprendre les spécificités propres à chacun des domaines technologiques et à chacun des électriciens, qui faciliteront, in-fine, l'interprétation des résultats et leur compréhension.

4. CONCLUSION

Nous décidons de concentrer nos travaux sur l'analyse des six électriciens suivants : EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola, et RWE. Ces électriciens ont été sélectionnés car ce sont les plus importants électriciens européens et, d'autre part, ils présentent un niveau de diversité intéressant pour l'analyse⁹⁷. Pour ces raisons, il sera possible d'agréger les informations de ces acteurs pour observer des résultats à l'échelle du secteur électrique européen pour un domaine technologique ou un ensemble de domaines technologiques. Des comparaisons seront ainsi possibles entre acteurs (ou ensemble d'acteurs) et entre domaines technologiques (ou ensemble de domaines technologiques).

Pour analyser les stratégies d'innovation des électriciens, nous nous appuierons sur l'analyse des stratégies technologiques et celles d'acquisition des connaissances. L'analyse des stratégies technologiques permettra de distinguer l'engagement dans les technologies de substitution relativement à celui observé dans les technologies d'addition. L'analyse des stratégies d'acquisition des connaissances permettra d'apprécier, sur la base des collaborations, dans quelle mesure une démarche d'ouverture est mobilisée. En particulier les trois critères suivants seront mesurés: le niveau de coopération, le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants et le niveau de co-construction de l'innovation.

Ce cadre d'analyse permettra de vérifier les hypothèses formulées et de répondre aux questions suivantes. Les domaines relevant de la substitution technologique font-ils l'objet d'une démarche d'acquisition plus ouverte et d'un niveau d'engagement plus marqué que les technologies relevant de l'addition ? Les électriciens disposant de l'intensité carbone la plus élevée sont-ils ceux qui font l'objet d'un engagement dans les technologies de substitution et d'une démarche d'ouverture des connaissances plus marquée que les électriciens les moins dépendants des énergies fossiles ?

Pour conduire l'analyse, nous nous appuierons sur les brevets déposés sur la période 2007-2013 et sur les projets collaboratifs menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD qui s'étend sur la même période. Pour collecter les brevets, nous utiliserons la base Patstat de l'Office Européen des Brevets que nous croiserons à l'Inventaire vert de l'OMPI. Pour analyser les projets, nous nous appuierons sur la base Cordis mise en place par la Commission européenne.

Nous constituons une méthodologie qui s'appuie sur deux indicateurs synthétiques calculés à partir des brevets et des projets. Le premier indicateur mesure l'intensité de l'engagement technologique. Le second indicateur capte le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances. Il est calculé sur la base de la moyenne pondérée du niveau de coopération, du niveau de collaboration avec les nouveaux entrants et du niveau de co-construction de l'innovation. Cette approche quantitative permettra de comparer les domaines technologiques (ou des ensembles de domaines) et les électriciens (ou des ensembles d'électriciens) entre eux. Nous accorderons donc plus d'importance au niveau relatif de chacun des indicateurs

⁹⁷ La présentation des enjeux de la transition énergétique de chacun des électriciens sera présentée dans les études de cas. Cf. Chapitre V- [Analyse des stratégies d'innovation des électriciens européens](#).

qu'à leur niveau absolu. De plus, nous mobiliserons une approche qualitative permettant de mieux comprendre les spécificités de chacun des domaines technologiques et des électriciens facilitant l'interprétation des résultats et permettant de comprendre leur origine.

Les chapitres suivants seront consacrés aux études de cas qui s'appuieront sur le cadre d'analyse et la méthodologie développés.

CHAPITRE IV- ETUDES DE CAS : UNE APPROCHE PAR DOMAINE TECHNOLOGIQUE

Cette section sera dédiée à l'analyse des cinq domaines technologiques retenus, à savoir : CCS, énergies renouvelables, hydrogène, nucléaire et smart grids. Ces domaines ont été sélectionnés eu égard à leur potentiel de réduction d'émissions et, consécutivement, au rôle qu'ils pourraient jouer dans la transformation du secteur électrique européen⁹⁸. En outre, ces domaines présentent un niveau de diversité intéressant aussi bien d'un point de vue « inter » qu'« intra » technologique. Nous sommes en présence de technologies qui permettent de produire de l'électricité (énergies renouvelables, fission nucléaire), d'améliorer les performances environnementales des centrales existantes (CCS), de stocker l'électricité (hydrogène) et de renforcer les réseaux de transmission et de distribution d'électricité (smart grids). De plus, les smart grids (réseau et intégration des EnR, gestion IT de la demande, véhicule électrique ...) et les énergies renouvelables (éolien, solaire, énergies des mers ...) incluent une variété de segments qui disposent de caractéristiques et de propriétés bien différentes.

Ces cinq domaines peuvent être classés selon qu'ils relèvent d'une démarche d'addition ou de substitution technologique. Cette distinction est importante dans la mesure où l'histoire de l'énergie met en évidence que les transitions énergétiques de l'ère industrielle ont toutes procédé d'une addition énergétique⁹⁹. Or, en Europe, dans le cas de la transition vers une économie sobre en carbone, certaines technologies ont vocation à s'ajouter au système existant tandis que d'autres ont pour objectif de remplacer les technologies établies. Ainsi, les énergies renouvelables et l'hydrogène ont vocation, à terme, à se substituer aux énergies fossiles et en particulier au charbon. A l'opposé, le CCS, la fission nucléaire et les smart grids sont des technologies qui ont vocation à s'appuyer sur l'architecture actuelle du système électrique afin d'en améliorer les performances. Les dispositifs de captage de carbone se « superposeront » aux centrales thermiques pour limiter les émissions de CO₂ dans des proportions pouvant atteindre jusqu'à 90% et les réseaux seront « complétés » par l'ajout de capteurs, de systèmes de télécommunications et de logiciels permettant d'optimiser la consommation d'électricité, faciliter l'intégration des Enr et offrir de nouveaux usages à l'électricité. Si ces technologies sont nécessaires pour réduire les émissions de CO₂, elles n'ont pas vocation à totalement affranchir l'usage du carbone dans la production d'électricité.

Si les technologies bas carbone ont fait l'objet de nombreuses études qui ont porté, pour la plupart, sur leur contribution respective à la réduction des émissions en fonction de différents scénarios (CE, 2013a ; AIE, 2015), elles sont moins fréquemment abordées sous l'angle de la

⁹⁸ Cf. Chapitre I, section [2.2.2 Focus sur cinq technologies bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique](#).

⁹⁹ Cf. Chapitre I, section [1.2.1 Un processus d'addition technologique](#).

distinction entre addition et substitution technologique et en creusant la question des modalités d'acquisition des nouvelles connaissances.

L'objet de ce chapitre consiste précisément à caractériser chacune des cinq technologies bas carbone en distinguant les innovations qui relèvent de l'addition et celles qui concernent la substitution. Pour chacune d'entre elles, nous nous intéressons, en particulier, à l'intensité de l'engagement du secteur et aux modalités d'acquisition des connaissances. Pour cela, nous nous appuyons sur les projets collaboratifs conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD et sur les brevets déposés entre 2007 et 2013¹⁰⁰ par EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola, RWE. Sur la base de ces données, nous construisons un premier indicateur qui mesure l'intensité de l'engagement du secteur et un second qui permet de mesurer l'intensité des collaborations des électriciens et d'en déduire si l'acquisition des connaissances fait l'objet d'une démarche d'ouverture plus ou moins marquée¹⁰¹. Cet indicateur « d'ouverture » est construit sur la base des trois critères suivants : « co-construction » qui permet d'apprécier dans quelle mesure l'innovation dans le domaine technologique considéré est plutôt réalisée en interne et se formalise par des brevets ou plutôt acquise grâce à des collaborations, « nouveaux entrants » qui mesure la part de projets menés avec significativement plus de nouveaux entrants que les autres projets, et « coopération » qui mesure l'intensité des collaborations entre électriciens.

Dans une première section, nous proposons de comparer les technologies relevant de l'addition et celles relevant de la substitution. Ce travail doit permettre de vérifier les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.

Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition.

Dans une seconde section, nous procéderons à une analyse de chacun des domaines considérés. Pour cela, nous commencerons par étudier les enjeux spécifiques de l'introduction du domaine technologique en question. Puis, nous distinguerons, d'une part, le niveau d'engagement du secteur électrique et, d'autre part, nous caractériserons les modalités d'acquisition des connaissances en analysant les différents « types de collaboration » (co-construction de l'innovation, coopération et collaboration avec les nouveaux entrants). Ces éléments permettront notamment de distinguer les domaines qui font l'objet d'une circulation des connaissances plutôt libre entre les acteurs, de ceux dont les électriciens limitent l'accès.

¹⁰⁰ Pour la justification du choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxys de l'innovation, cf. Chapitre III, section [2. Présentation des données](#) pour la justification du choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxys de l'innovation.

¹⁰¹ La méthodologie est présentée dans le chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

1. COMPARAISON DES DOMAINES TECHNOLOGIQUES

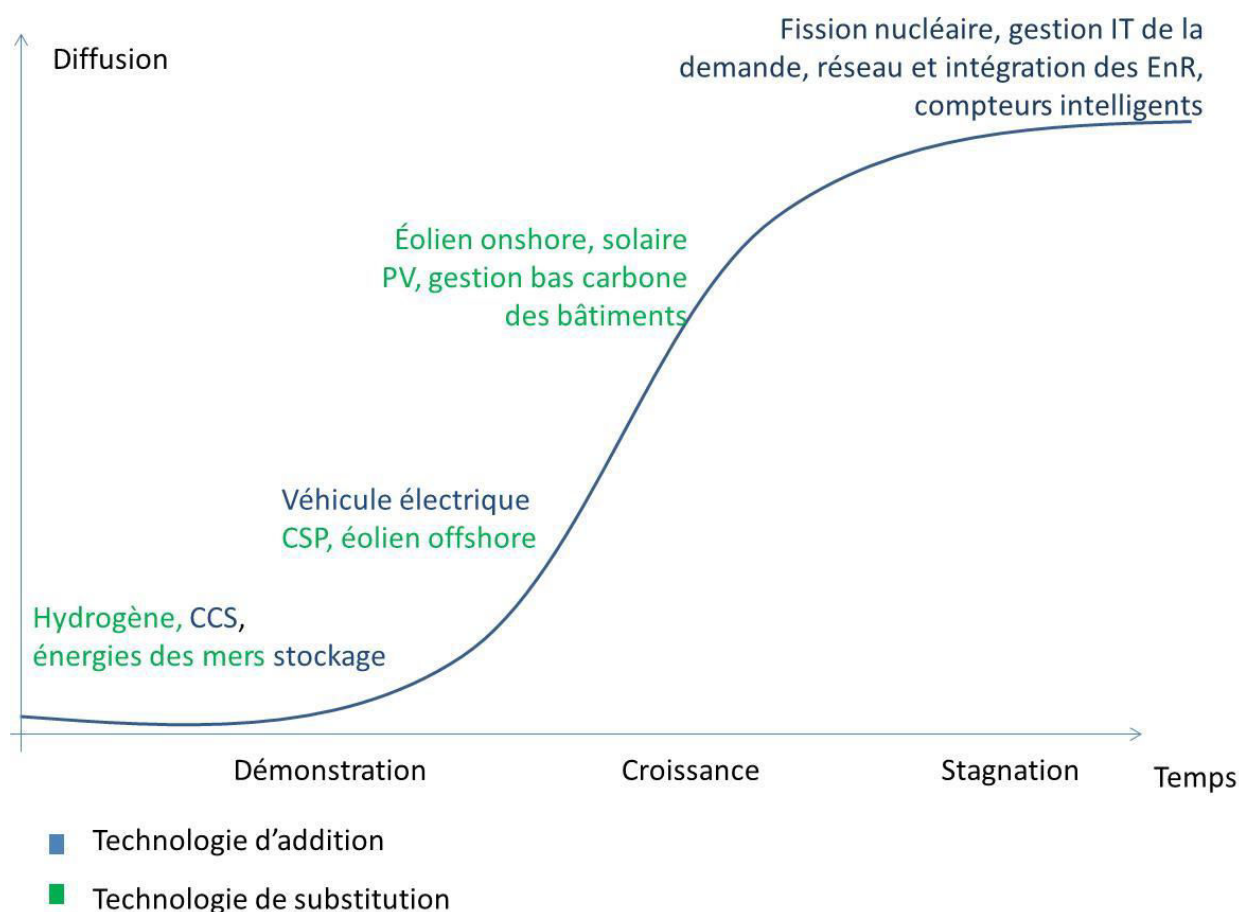
Grâce aux indicateurs constitués à partir des données collectées dans les bases de brevets déposés et des projets menés entre 2007 et 2013, nous allons, dans un premier temps, déterminer dans quelle mesure les technologies de la substitution (énergies renouvelables, hydrogène) relèveraient d'un engagement plus marqué et d'une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte que les technologies d'addition (CCS, smart grids et fission nucléaire). Une comparaison essentielle pour apprécier la trajectoire d'innovation poursuivie par le secteur électrique européen dans la lutte contre le réchauffement climatique, et qui nécessite, au préalable, d'examiner les différents domaines technologiques en termes de niveau de maturité, de budgets de R&D alloués, de nature de déposants de brevets et d'opérations en capital-risque réalisées au bénéfice de jeunes entreprises. Autant d'éléments de contexte indispensables à la compréhension de l'environnement dans lequel évoluent aujourd'hui les électriciens, et des différentes forces en présence auxquelles ils doivent se confronter pour introduire les domaines technologiques bas carbone.

La maturité technologique est généralement illustrée par une « courbe en S » (Rogers, 1962), qui représente l'évolution de la diffusion en fonction du temps. Dans le cas des technologies qui nous occupent, cet exercice paraît, au mieux, incertain. Dans la mesure où ces dernières sont extrêmement diversifiées tant au niveau inter qu'intra technologique (tout particulièrement le domaine des smart grids qui couvre une large variété de segments¹⁰²), il est en effet impossible de mesurer la diffusion selon une unité unique¹⁰³. C'est pourquoi, il a paru plus judicieux de prendre pour source les travaux de l'AIE édités en 2015 dans la publication *Energy Technology Perspectives* (AIE, 2015b), qui proposent quelques éléments pertinents.

¹⁰² Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

¹⁰³ Par exemple, la diffusion des énergies renouvelables se mesure en capacités installées, celle des véhicules électriques par le volume des unités commercialisées, et celle du CCS en tonnes de CO₂ capté.

Figure 36 : Comparaison du niveau de maturité des technologies bas carbone étudiées



Source : auteur, à partir de AIE (2015b)

Premier constat, le degré de maturité bien supérieur des technologies d'addition : la fission nucléaire et la gestion IT de la demande ont déjà connu un déploiement à grande échelle¹⁰⁴ alors qu'aucune technologie de substitution n'a encore atteint, aujourd'hui, ce stade de développement. On remarque cependant une forte hétérogénéité au sein de chacun des domaines : le CCS et les énergies des mers (qui relèvent respectivement de l'addition et de la substitution) sont toutes deux très peu matures, alors qu'à la fois les capacités éoliennes et le photovoltaïque (substitution) et le nucléaire (addition) connaissent comparativement un niveau de diffusion élevé. Concernant les dépenses de R&D réalisées en Europe en 2010¹⁰⁵ (CE, 2013b), ressortent les écarts significatifs entre les budgets de R&D alloués aux différentes technologies, qui varient selon un facteur de 4,5 (environ 300 M€ pour les smart grids contre 1 400 M€ pour le nucléaire), et entre les financements publics, tout aussi dissemblables. Plusieurs facteurs semblent susceptibles d'expliquer ces décalages : toutes les technologies ne nécessitent pas le même apport en capital pour se développer, ni ne disposent du même niveau de maturité. En outre, elles ne relèvent pas du même niveau de priorité pour

¹⁰⁴ Les capteurs, les logiciels et les systèmes de télécommunication sont des technologies déjà significativement adoptées dans le domaine des télécommunications alors que dans le secteur électrique elles sont en cours de diffusion.

¹⁰⁵ La date de 2010 se situe précisément entre 2007 et 2013 et permet donc de donner une idée des budgets annuels consacrés à la R&D au moment de l'étude.

les pouvoirs publics, ni du même potentiel de marché pour les industriels. C'est, par exemple, la construction du réacteur ITER, mis en chantier pour expérimenter la fusion nucléaire qui justifie le montant conséquent de R&D dans ce domaine, le plus élevé des technologies considérées. Plus généralement, le nucléaire implique de considérables investissements en capital - la fusion en est encore au stade de la recherche fondamentale – qui, assorti au fort potentiel de cette technologie, expliquent le financement substantiel accordé par l'Union européenne. A l'inverse, notons que l'hydrogène est absent de ce classement, ce qui confirme la faible priorité de ce secteur pour les acteurs privés comme publics.

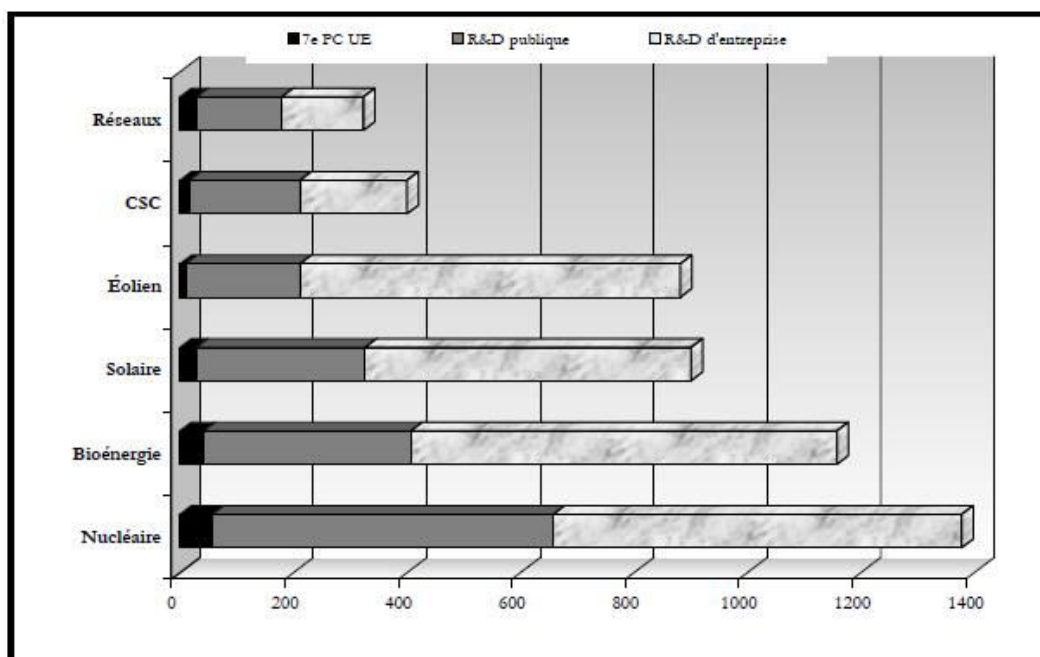
Deuxième observation, on remarque qu'en cumulant les budgets de recherche consacrés à l'éolien, au solaire et aux bio-énergies, les énergies renouvelables bénéficient du montant le plus conséquent de R&D à l'échelle européenne ; ce qui paraît cohérent avec l'objectif de l'Union européenne d'augmenter leur part dans des délais relativement brefs ¹⁰⁶. De la même manière, la somme des financements privés qui leur est allouée est la plus élevée de l'ensemble des technologies considérées, probablement du fait de leur potentiel de marché et de la maturité de l'éolien et du photovoltaïque.

Enfin, on constate que, globalement, le soutien financier s'équilibre entre technologies de substitution et d'addition (de l'ordre de 2050 M€)¹⁰⁷. Toutefois le financement privé est fléché prioritairement vers les technologies de substitution (environ 1500 M€ contre 1050 M€ pour les technologies d'addition) alors que les bailleurs publics privilégient le financement des technologies d'addition (à hauteur de 1000 M€ contre 583 M€ pour les technologies de substitution). Sans présager outre mesure du positionnement précis de chacun des électriciens, ces premiers résultats semblent indiquer un engagement plus marqué des acteurs privés au bénéfice des innovations relevant de la substitution technologique.

¹⁰⁶ Le Paquet Energie Climat, signé en 2014, fixe pour objectif, à horizon 2030, une part de 28,7% des énergies renouvelables dans la consommation finale.

¹⁰⁷ Afin de distinguer les moyens consacrés aux technologies de substitution (énergies renouvelables, bio énergie) de ceux dédiés à l'addition technologique (CCS, smart grids et nucléaire) et, dans la mesure où la bioénergie dispose d'applications dans le secteur électrique mais aussi dans le secteur de la chaleur ou celui des transports, nous ferons l'hypothèse qu'un tiers du budget de R&D sur la bioénergie est dédié au secteur électrique.

Figure 37 : Estimation des dépenses de R&D publiques et privées par domaine technologique en 2010



Source : CE (2013b)

Un premier faisceau d'indications certes porteuses d'une vision globale, mais qui ne permettent pas de saisir toute la complexité du bouleversement des équilibres au sein du secteur électrique, notamment du fait l'arrivée des nouveaux entrants. C'est dans cette perspective qu'il a donc paru opportun de comparer chaque domaine technologique sur la base des opérations en capital-risque au bénéfice d'entreprises innovantes et des principaux déposants de brevets ; des éléments qui devraient, selon notre hypothèse, constituer un critère distinctif entre technologies de substitution et d'addition.

Les opérations d'investissement en capital-risque permettent de financer une jeune entreprise, pour renforcer sa technologie et/ou conquérir de nouveaux marchés. Réalisées dans le champ des innovations environnementales, elles se révèlent donc un outil précieux pour jauger la perception des investisseurs quant au potentiel des jeunes entreprises à s'introduire avec succès, et à court terme, dans le secteur. De même que les brevets représentent un indicateur révélateur¹⁰⁸ de l'innovation produite dans un domaine spécifique. Identifier les secteurs d'origine des principaux déposants va nous aider à distinguer les connaissances développées par des acteurs déjà établis de celles des nouveaux entrants, et la concentration des brevets, par domaines, à entrevoir le pouvoir de marché respectif des principaux déposants sur chacune des technologies étudiées.

Pour ce faire, deux sources distinctes ont été mobilisées : les travaux réalisés par le Cleantech Group, pour apprécier l'évolution des opérations d'investissement en capital, et les trois

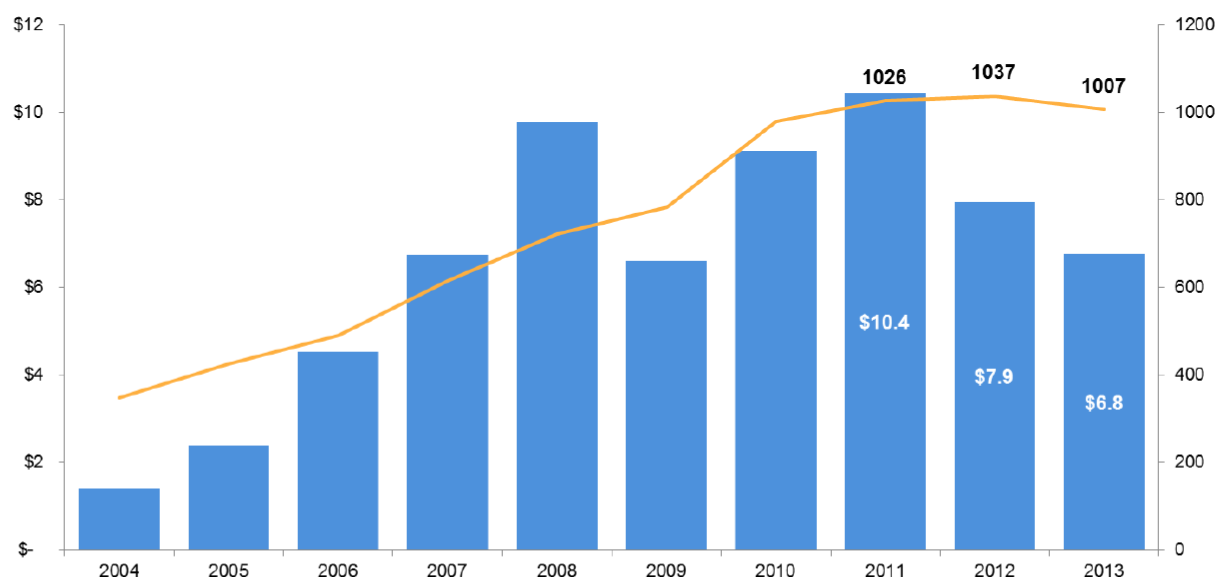
¹⁰⁸ C'est une source régulièrement utilisée dans la littérature pour mesurer l'innovation dont les caractéristiques et les limites ont été présentées au Chapitre III, section [2.2 Le choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxys de l'innovation.](#)

rapports récents publiés par l'OEB, l'ICTSD et l'UNEP (2010), Full cell today (2012) et Relecura (2013)¹⁰⁹ pour identifier les principaux déposants de brevets. Notons que les études recensées considèrent les brevets et les opérations en capital-risque sur des zones géographiques et des périodes de temps différentes ; bien qu'elles ne traitent pas spécifiquement de l'Europe ni de la période étudiée (2007-2013), elles offrent la possibilité de distinguer les grandes tendances d'innovation relatives à notre étude, sans toutefois satisfaire aux exigences d'une analyse approfondie des domaines concernés.

Plusieurs observations ressortent de l'examen de ces différentes sources.

Premièrement, l'augmentation significative (Figure 38) des opérations de capital-risque réalisées entre 2004 et 2013 et des brevets¹¹⁰ déposés¹¹¹. Un résultat assez peu surprenant, qui atteste de la prise de conscience croissante des entreprises quant au problème climatique et souligne les enjeux économiques sous-jacents à ce défi.

Figure 38 : Evolution des opérations de capital investissement entre 2004 et 2013 en nombre et en montant (Md\$)



Source : Cleantech Group (2014)

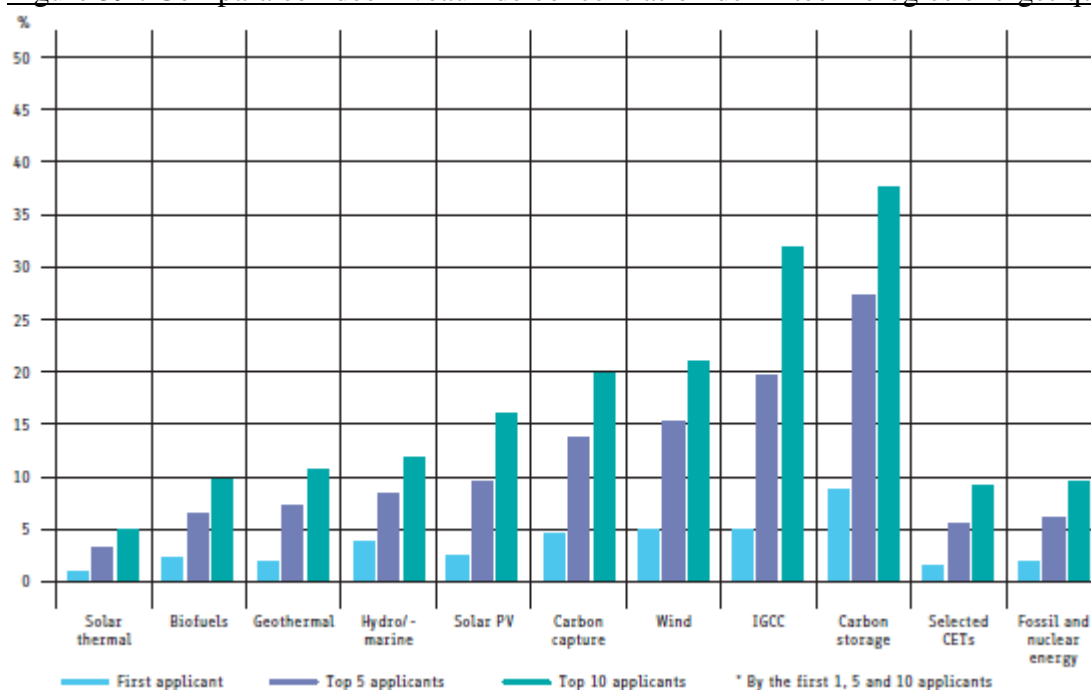
¹⁰⁹ Le rapport « Patents and clean energy: bridging the gap between evidence and policy » publié en 2010 par l'OEB, l'ICTSD et l'UNEP permet d'identifier l'évolution des brevets déposés dans les technologies faisant l'objet de notre étude et d'identifier les principaux déposants dans le domaine du CCS. Le rapport « Fuel cell patent review » 2012 (Fuel Cell today) propose une analyse approfondie des brevets déposés dans l'hydrogène et les piles à combustible et permet d'identifier les déposants les plus actifs dans ce domaine. La WIPO a publié en 2014 une étude des brevets déposés dans le domaine des énergies renouvelables. Enfin, les tendances sur les brevets déposés dans les smart grids seront identifiées à partir de l'étude « Smart Grids Patent Analysis » publiée en 2013 par Relecura.

¹¹⁰ Le Clean Energy Patent Growth Index, publié par le Cleantech Group et Heslin Rothenberg Farley & Mesiti P.C., met en évidence que le nombre des brevets énergétiques déposés a quasiment triplé entre 2013 et 2004.

¹¹¹ Si l'augmentation du nombre de brevets dans les technologies environnementales est significative, il est, toutefois important de rappeler que la protection de la propriété intellectuelle s'inscrit dans une tendance globale. L'Office Internationale de la Propriété Intellectuelle remarquait que les demandes de brevets augmentent de l'ordre de 5% par an et ont dépassé, pour la première fois en 2013, le seuil de 200 000.

Deuxièmement, l'hétérogénéité – attendue - des niveaux de concentration¹¹² des technologies (Figure 39) mais – étonnamment - en rien corrélée à leur degré de maturité respectif. Par exemple, les technologies fossiles et nucléaires relèvent d'un niveau de concentration assez faible¹¹³, comparable à celui des biofuel alors même qu'elles sont, contrairement à ce dernier, largement diffusées sur le marché. De même, la concentration des technologies de captage du carbone est quasiment identique à celle de l'éolien mais sensiblement plus élevée que celle du solaire thermique, des énergies des mers ou du solaire photovoltaïque, qui divergent radicalement en termes de niveau de diffusion. Un constat d'autant plus surprenant que les résultats ont été retraités en prenant soin de tenir compte des opérations de fusion et acquisition. Des écarts qui, toutefois, pourraient se justifier par le degré de difficulté à développer les connaissances requises, qui varie selon les technologies et, cela, indépendamment des niveaux de maturité des dites technologies. En conséquence, les électriciens disposeront d'un pouvoir de négociation moindre sur le CCS et l'éolien par rapport à celui dont ils disposeront pour les technologies les moins concentrées. Notons, enfin, qu'il est impossible de distinguer technologies d'addition et de substitution sur la base du niveau de concentration des brevets, - d'autant plus en l'absence de relevé concernant les smart grids et l'hydrogène.

Figure 39 : Comparaison des niveaux de concentration de 11 technologies énergétiques¹¹⁴



Source : UNEP, EPO, ICTSD (2015)

¹¹² La concentration est mesurée, pour une technologie donnée, comme le nombre de brevets respectivement déposé par le premier, les cinq premiers et les dix premiers déposants de brevets, rapporté à l'ensemble des brevets déposés.

¹¹³ Le niveau de concentration des brevets dans les domaines du nucléaire et des technologies fossiles particulièrement faible au regard de celui observé dans les autres technologies est surprenant dans la mesure où le secteur a donné lieu à des opérations de fusions acquisition qui sont prises en compte dans le calcul de la concentration.

¹¹⁴ Pour construire cette figure, les auteurs ont collecté les brevets à partir de la base Patstat pour la période 1978-2007. Le graphique tient compte des opérations de fusion et acquisitions.

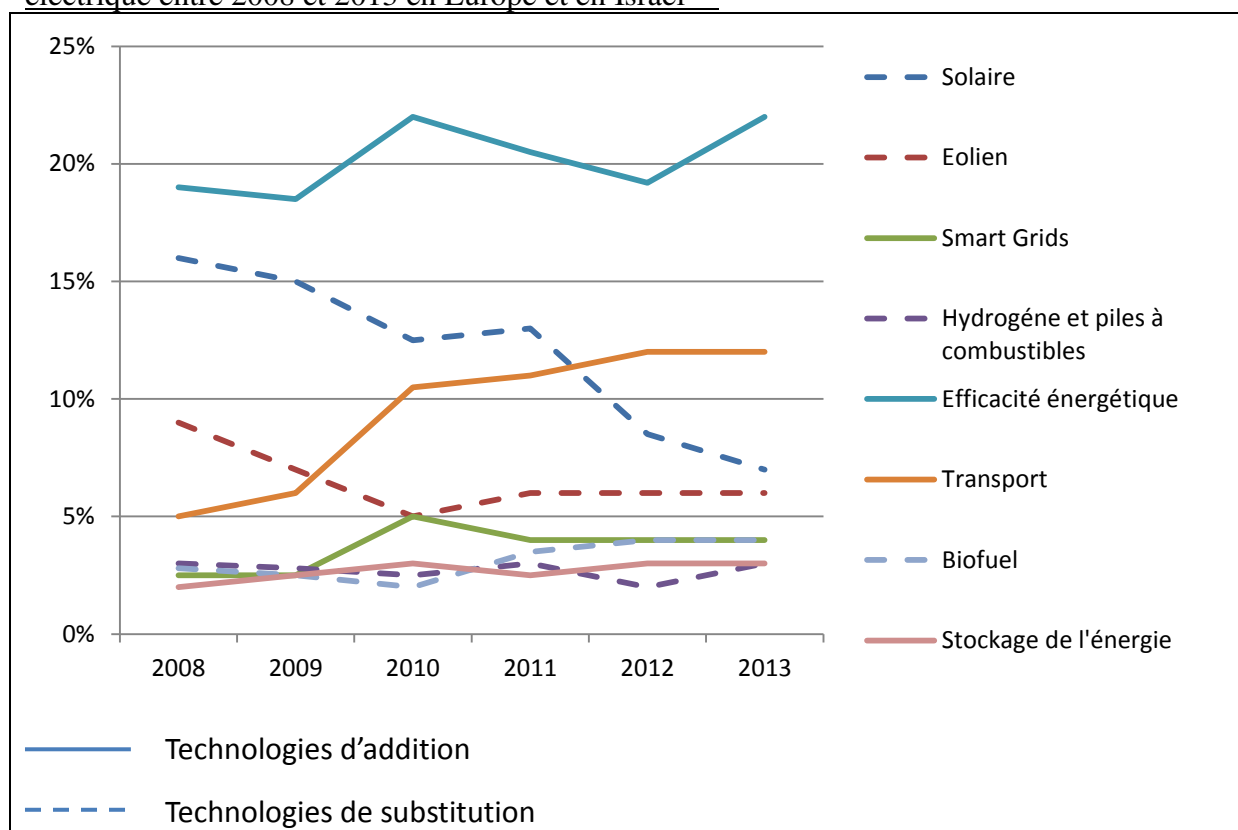
Troisième constat, l'analyse des déposants de brevets¹¹⁵ met en évidence la prééminence des grands groupes et, ce, dans chacun des domaines technologiques, qu'ils relèvent de l'addition ou de la substitution. Ces grands groupes sont subdivisés entre « industriels diversifiés », soit des acteurs établis dans le secteur électrique sans être toutefois des « pure players » de l'électricité, et les nouveaux entrants qualifiés « d'adjacents » (Erlinghagen et Markard, 2012). Rappelons que ces derniers sont historiquement établis dans un secteur différent de celui du secteur électrique mais tirent parti de la transition énergétique pour déployer leur technologie dans ce secteur. On peut citer, parmi eux, les principaux déposants de l'hydrogène et de la pile à combustible, issus de l'automobile, ceux du CCS, originellement entreprises de gaz industriels, ou ceux du solaire photovoltaïque, venus du secteur électronique. Toutefois, leur participation respective au dépôt de brevets, en tant qu'adjacents ou industriels diversifiés ne préjuge en rien de la nature du domaine technologique, de substitution ou d'addition. Notons enfin qu'aucun électricien n'est recensé parmi les déposants de brevets les plus actifs : en tant qu'opérateurs d'infrastructures de production et/ou de transport d'électricité, l'innovation est principalement apportée par les fournisseurs¹¹⁶.

Les start up n'ont pas vocation à « bousculer » les acteurs en place dans les mêmes proportions selon les domaines technologiques. C'est en tout cas ce qu'il ressort du calcul de la proportion d'investissement réalisé ci-dessous. Dans la mesure où certains domaines technologiques sont plus intensifs en capital que d'autres, c'est le nombre d'opérations qui a été retenu, préférentiellement au montant des investissements.

¹¹⁵ Cf. [Annexe 6 : Principaux déposant de brevets dans les domaines technologiques étudiés.](#)

¹¹⁶ Cf. Chapitre III, section [2.2 Le choix des brevets et des projets collaboratifs comme proxy de l'innovation.](#)

Figure 40 : Evolution du nombre d'opérations en capital des cleantech relatives au secteur électrique entre 2008 et 2013 en Europe et en Israël¹¹⁷



Source : auteur, à partir de Cleantech Group (2013)

D'une manière générale, il ressort de la figure 40 la part conséquente des technologies associées au secteur électrique, qui ont fait l'objet de plus de 60% des opérations sur la période 2008-2013 ; une observation qui confirme une fois encore le rôle déterminant joué par les jeunes entreprises dans la transition énergétique actuelle. Une analyse plus fine mène aux observations suivantes :

Premier constat, le domaine du nucléaire et celui du CCS¹¹⁸ ne sont pas concernés par les opérations d'investissement en capital. On peut en déduire que l'innovation de ces deux secteurs émanera essentiellement des entreprises déjà établies, et non des jeunes entreprises qui joueront vraisemblablement un rôle plus mineur dans leur introduction. Notons également que, au regard de la part particulièrement faible d'opérations en capital-risque réalisée dans l'hydrogène, les start up devraient occuper ici, au moins à court terme, encore une place peu décisive. On peut en déduire que les acteurs en place et les adjacents sont aujourd'hui plus critiques pour produire et diffuser l'innovation dans l'hydrogène que les jeunes pousses. On peut toutefois supposer que la part moindre en opérations en capital dans les domaines de

¹¹⁷ Pour plus de lisibilité, nous représentons sur ce graphique exclusivement les technologies environnementales qui concernent directement ou indirectement le secteur électrique, ce qui explique que le total cumulé soit inférieur à 100%.

¹¹⁸ Il est possible que le CCS soit inclus dans l'efficacité énergétique. Cependant, le fait qu'il ne fasse pas l'objet d'une catégorie spécifique signifierait que la part des opérations relatives à ce domaine serait inférieure à la plus petite part retenue (3% pour l'hydrogène).

l'hydrogène et du CCS découle de leur stade encore peu avancé de maturité, et donc des risques technologiques encore trop élevés pour les investisseurs.

Deuxième constat, le domaine des énergies renouvelables est celui qui fait l'objet du plus grand nombre d'opérations cumulées ; un résultat qui confirme le poids des jeunes entreprises dans ce secteur. Une tendance également révélatrice de la compétition intense qui s'engage au niveau de la fourniture des technologies de conversion entre acteurs en place (soit les industriels diversifiés déjà actifs dans le secteur électrique), adjacents¹¹⁹ et jeunes entreprises et, concernant l'exploitation des parcs, entre électriciens et nouveaux opérateurs. Notons que les domaines les plus attractifs pour les investisseurs sont, dans l'ordre, le solaire, suivi de l'éolien et des bio-énergies¹²⁰.

Il est difficile de formuler des conclusions définitives quant au rôle des jeunes entreprises dans les smart grids dans la mesure où l'on ignore le périmètre précis des catégories « smart grids », « efficacité énergétique » et « transport »¹²¹. Cependant, en cumulant la part des opérations réalisées entre 2008 et 2013 dans le domaine des smart grids avec la part des opérations réalisées dans la catégorie stockage, et sans prendre en compte les éventuels chevauchements avec les catégories « transport » et « efficacité énergétique », le total atteint 7%, ce qui classerait les smart grids en seconde position derrière les énergies renouvelables. Les jeunes entreprises devraient donc, là encore, jouer un rôle particulièrement actif.

Dernier constat, la part des investissements destinés aux technologies de substitution (éolien, solaire, bio-énergies, hydrogène, transport) s'élève à 33,8% alors que la part des investissements dédiée aux technologies d'addition (efficacité énergétique, smart grids, stockage) atteint seulement 26,5%. Si ce résultat doit être pris avec précaution pour les raisons évoquées précédemment (à savoir le défaut de lisibilité des technologies incluses dans les différentes catégories), il n'en suggère pas moins une forme de prédilection des investisseurs pour les technologies de substitution. Ce qui tend à insinuer que ces derniers anticiperaient que les technologies de substitution représenteront, à court terme, un investissement qui générera une performance supérieure à celle offerte par les technologies d'addition. Un résultat cohérent avec celui observé lors de l'analyse des budgets de R&D, déjà manifeste de l'intérêt plus marqué de la part des acteurs privés pour les innovations de substitution.

Ces différents résultats permettent de différencier, dans une certaine mesure, les technologies de substitution et d'addition. On constate en effet, à la lumière des dépenses de R&D et des investissements en capital-risque, que les acteurs privés privilégient l'innovation dans les

¹¹⁹ Nous avons montré, au début de cette section, que les principaux déposants de brevets étaient soit des adjacents soit des industriels diversifiés

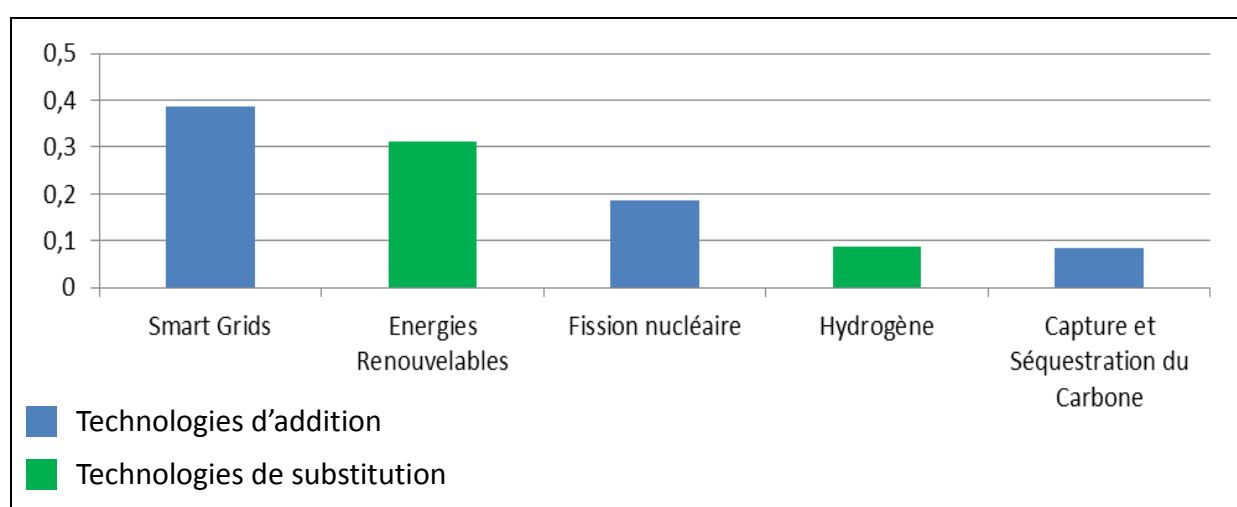
¹²⁰ Si ce classement reste constant au fil du temps, on peut expliquer la diminution des investissements dans les domaines de l'éolien et du solaire, d'une part, en raison de la baisse des tarifs de rachat sur la période considérée, et d'autre part, en raison de l'augmentation du niveau de maturité des technologies, conduisant à limiter les opportunités pour les investisseurs. En outre, dans le cas du photovoltaïque, les technologies européennes se sont vues concurrencées par la production de masse des équipementiers chinois qui ont mécaniquement fait chuter l'intérêt des investisseurs pour les producteurs européens.

¹²¹ Par exemple, nous ignorons si les opérations relatives au financement de start up dans le domaine des bornes de recharge des véhicules électriques sont comptabilisées dans la catégorie « Transport » ou dans la catégorie « smart grids ».

domaines relevant de la substitution énergétique. L'analyse des brevets et des opérations en capital-risque révèle, en outre, que les nouveaux entrants, tant les grands comptes que les jeunes entreprises innovantes, seront particulièrement actifs pour introduire les technologies de ce domaine, bouleversant, de fait, les relations des électriciens avec leurs partenaires historiques. Un premier bilan assez logique, dans la mesure où ces technologies (principalement les énergies renouvelables) ont vocation à limiter les émissions dans des proportions supérieures aux technologies d'addition que sont le CCS, et le nucléaire¹²².

L'indicateur suivant, dont la méthodologie est présentée au Chapitre III¹²³, permet d'évaluer l'engagement du secteur électrique de façon plus précise, en distinguant les différents domaines technologiques.

Figure 41 : Intensité de l'engagement du secteur dans les domaines technologiques



Source : auteur à partir des bases Patstat et Cordis

On observe que les smart grids et les énergies renouvelables se détachent nettement en termes de leur intensité d'engagement. Soulignons, également, le classement surprenant de la fission nucléaire et du CCS : le nucléaire se place au troisième rang, alors même que de nombreux pays (Allemagne, France, Italie) ont exprimé leur souhait de limiter, voire de renoncer, à l'usage de cette énergie¹²⁴. Le CCS se classe au dernier rang des technologies les plus explorées, et, ce, bien que plusieurs électriciens soient particulièrement dépendants des énergies fossiles.

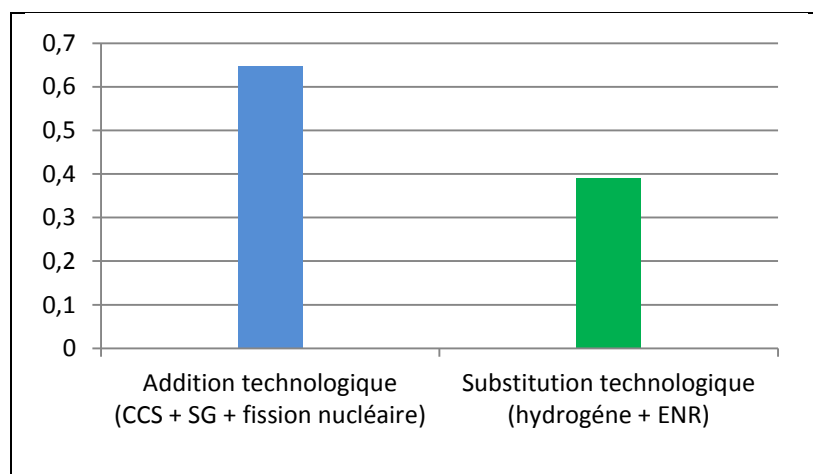
Pour procéder au comparatif de l'engagement des électriciens, par type de domaine technologique (d'addition ou de substitution), l'indicateur suivant a été conçu en agrégeant, d'une part, les données relatives au CCS, au nucléaire et aux smart grids (technologies d'addition) et, d'autre part, celles relatives aux énergies renouvelables et à l'hydrogène (technologies de substitution).

¹²² Cf. Chapitre I, section [2.2.2 Focus sur cinq domaines technologiques bas carbone en mesure d'assurer la transition énergétique du secteur électrique](#).

¹²³ Cf. Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

¹²⁴ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

Figure 42 : Comparaison de l'intensité de l'engagement dans les technologies d'addition et de substitution technologique



Source : auteur

La Figure 42 met en évidence qu'à l'échelle du secteur, les technologies d'addition sont privilégiées aux technologies de substitution. Ce résultat invalide l'Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.

On peut, d'abord, interpréter ce résultat en observant que les électriciens s'engagent logiquement en priorité vers des technologies matures¹²⁵ dont le risque technologique est, par conséquent, moindre. Seconde piste d'interprétation, le secteur poursuivrait une stratégie d'accumulation créatrice. Par opposition à la notion de « destruction créatrice » de Schumpeter (1939) qui théorise la destruction des compétences des entreprises en place et leur éviction du marché au bénéfice de nouveaux entrants, le concept d'accumulation créatrice est fondé sur l'idée qu'une entreprise en place innove en capitalisant sur les connaissances existantes et en élargissant son processus de recherche « à des sources externes à travers des partenariats avec des spécialistes et des nouveaux fournisseurs et le développement de systèmes intégrant des composants nouveaux et existants » (Bergek et al, 2013)¹²⁶. Signalons que cette interprétation est en opposition avec les conclusions d'Horbach (2008), qui considérerait que le principal facteur d'introduction des innovations environnementales était la réduction des coûts. Si cette dimension est, en effet, décisive dans le cas du CCS, où une réglementation contraignante déprécierait la valeur des actifs responsables des émissions (« actifs échoués »), et dans celui des smart grids, qui ont vocation à économiser de l'énergie grâce à une meilleure gestion de la demande, le facteur coût ne justifie pas à lui seul l'engagement massif constaté dans ces domaines. L'introduction des smart grids s'inscrit dans la nécessité de gérer la complexité due à l'introduction des énergies renouvelables (réseaux bidirectionnels et communicants). Et celle du CCS, se justifie également par son rôle crucial

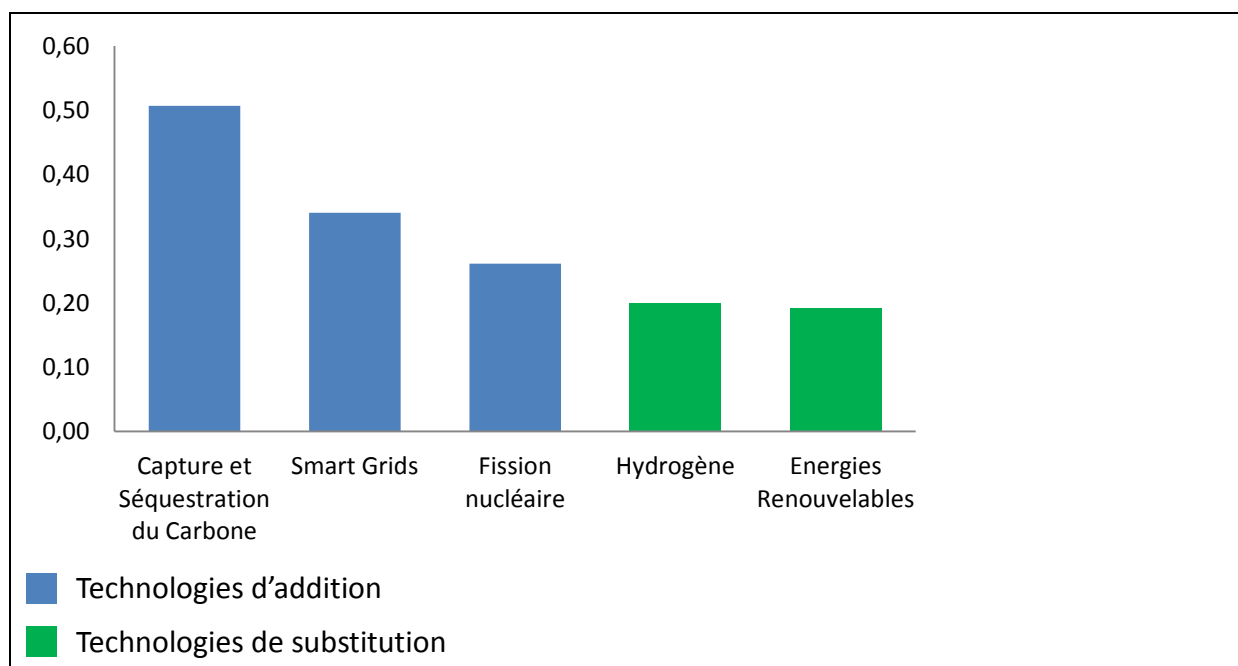
¹²⁵ Nous mettons en évidence au début de cette section que les technologies d'addition étaient globalement plus matures que celles relevant de la substitution.

¹²⁶ On remarquera, en outre, que les trois domaines relevant de l'addition technologique constituent trois quarts des projets collaboratifs menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD, attestant une volonté « d'élargir le processus de recherche à des sources externes ».

dans la situation actuelle, puisqu'il permet d'augmenter les performances environnementales des centrales thermiques, dans un contexte où l'énergie fossile est appelée à garder durablement une place majeure dans le mix énergétique mondial¹²⁷. Notons enfin que, bien qu'il soit délicat de comparer un engagement mesuré à partir des budgets mobilisés, comme cela a été effectué par le Joint Research Center (2013)¹²⁸, avec un engagement quantifié à partir d'un indicateur établi sur la base des brevets et des projets collaboratifs tel que nous l'avons construit, il semble, néanmoins, patent que les priorités technologiques des électriciens diffèrent radicalement de celles relevées pour l'ensemble des acteurs privés. Alors que les travaux de la Commission européenne (2013a) et du Cleantech Group désignaient les technologies de substitution comme objets privilégiés de l'engagement des acteurs privés, il semblerait ici, en revanche, que les électriciens se concentrent prioritairement sur l'exploration des technologies d'addition.

L'indicateur de synthèse¹²⁹ suivant s'attache à comparer le niveau d'ouverture des modalités d'acquisition des connaissances pour chacun des domaines technologiques considérés, afin de vérifier une autre hypothèse énoncée en préalable, à savoir que l'acquisition des connaissances dans les technologies de substitution ferait l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée que celles de l'addition.

Figure 43 : Classement des domaines technologiques en fonction du niveau d'ouverture de leur stratégie d'acquisition des connaissances



Source : auteur à partir des bases Cordis et Patstat

¹²⁷ Cf. Chapitre I, section [2.2 Le cas du secteur électrique en Europe](#).

¹²⁸ Cf. [Figure 36 : Estimation des dépenses de R&D publiques et privées par domaine technologique en 2010](#).

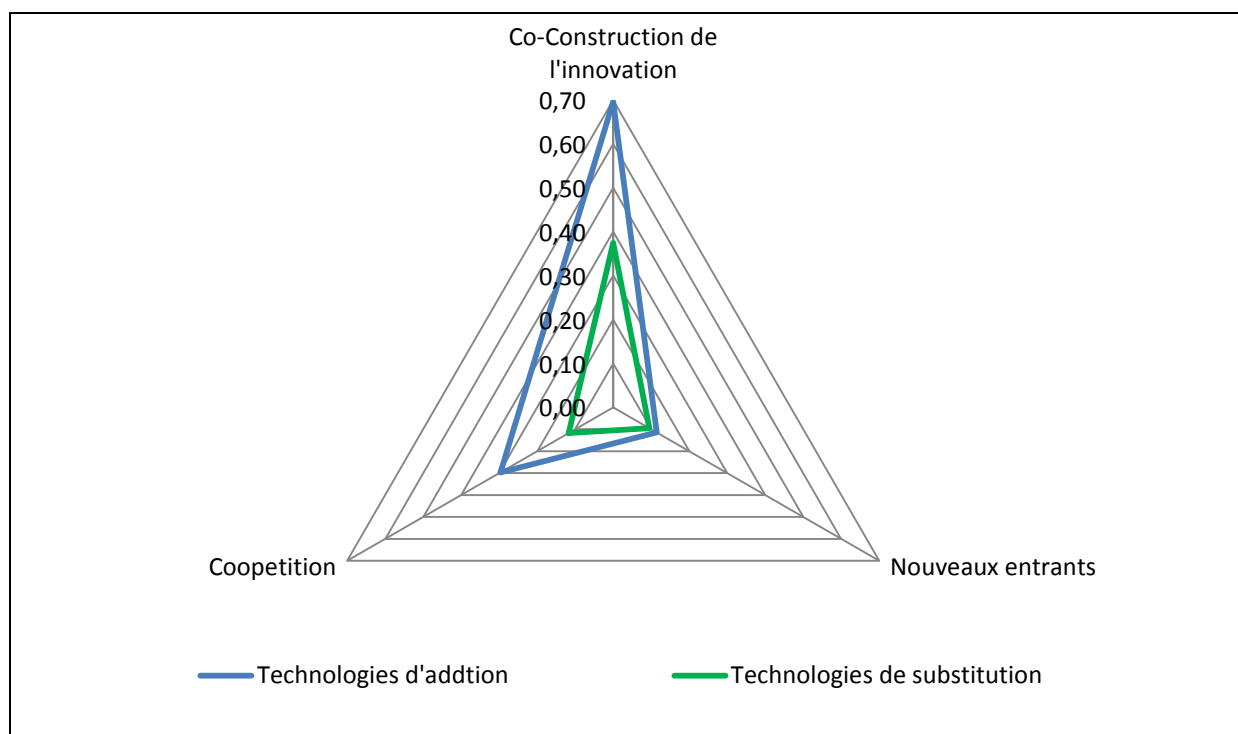
¹²⁹ Cet indicateur, dont la méthodologie est présentée au chapitre III, section 3 Méthodologie, s'appuie sur le niveau de coopération, le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants et le niveau de co-construction de l'innovation.

Contrairement à ce que nous formulions dans l'Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition, la Figure 43 met en évidence, qu'à l'échelle du secteur, les technologies relevant de l'addition technologique (CCS, smart grids et fission nucléaire) font l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée que celles de la substitution.

Un résultat qui peut toutefois s'expliquer de la façon suivante : dans la mesure où l'introduction du CCS, des smart grids et la fission nucléaire s'appuient sur des connaissances familières, l'introduction des innovations relevant de l'addition peut s'appuyer sur un réseau de partenaires déjà établi alors que, dans le cas des technologies de substitution technologique, ces réseaux doivent être constitués.

Pour affiner ces premiers résultats, et tenir compte de toute la complexité du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances en fonction des différents domaines, nous allons les comparer sur la base des trois critères utilisés pour construire l'indicateur synthétique (niveau de « Coopétition », niveau de « Collaboration avec les nouveaux entrants », niveau de « Co-construction de l'innovation »)

Figure 44 : Comparaison des technologies d'addition et de substitution sur la base des trois critères utilisés pour mesurer le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

Trois constats s'imposent clairement. Tout d'abord, le critère « collaboration avec les nouveaux entrants » se situe à un niveau particulièrement bas, dans le cas des technologies de substitution comme d'addition. Ce qui tend à signifier que, globalement, les électriciens s'appuient davantage sur les acteurs existants du secteur électrique pour innover, alors même

que les jeunes entreprises et les adjacents ont vocation à jouer un rôle majeur dans cette transition, et tout particulièrement dans les technologies de substitution.

Deuxième constat, les collaborations avec les nouveaux entrants ne constituent pas un critère propre à différencier les technologies d'addition ou de substitution. Il faudra, toutefois, veiller à vérifier si ce résultat reste valable au niveau individuel, en identifiant si certains domaines se singularisent à cet égard.

En revanche, et c'est notre troisième constat, les technologies de substitution se distinguent des technologies d'addition par un niveau globalement plus faible en termes de co-construction de l'innovation et de coopétition. Ce qui signifie que, dans le cas des technologies de substitution, la génération interne de l'innovation est privilégiée au détriment des collaborations avec l'écosystème et, que de la même façon, les compétiteurs ne sont que modestement associés au processus d'innovation. On observe donc ici des électriciens soucieux de protéger leurs nouvelles connaissances, constatation somme toute assez logique si l'on considère que les domaines relevant de la substitution permettent de disposer d'avantages compétitifs plus importants que ceux offerts par les technologies d'addition.

Au vu de l'ensemble de la comparaison des différents domaines technologiques, s'impose un premier bilan paradoxal : bien que les technologies de substitution soient privilégiées par les acteurs privés et caractérisées par le rôle déterminant des nouveaux entrants, ce sont les technologies d'addition qui font à la fois l'objet, de la part des électriciens, d'un engagement plus marqué et d'une démarche d'ouverture plus soutenue que les technologies de substitution.

Ces premiers résultats doivent, toutefois, être interprétés avec précaution dans la mesure où chacun des domaines technologiques étudiés dispose de caractéristiques singulières, qu'il convient désormais d'étudier pour prendre en compte toute la complexité de cette transition.

2. ANALYSE DES DOMAINES TECHNOLOGIQUES

De nombreuses études ont été consacrées aux technologies développées pour lutter contre le réchauffement climatique. Qu'il s'agisse de publications académiques, de rapports de la Commission européenne ou de publications d'institutions reconnues telles que l'AIE, elles portent généralement sur les contributions des technologies bas carbone, les scénarios de réduction des émissions ou les différents coûts associés¹³⁰. Des analyses utiles à bien des égards, en particulier dans une optique d'élaboration des politiques publiques (« policy design ») puisqu'elles permettent d'aiguiller les pouvoirs publics sur l'articulation des instruments économiques à mettre en place pour faciliter l'adoption de technologies bas carbone.

En revanche, relativement peu de travaux se sont penchés sur les conditions dans lesquelles va s'opérer leur introduction au sein du secteur électrique européen. En particulier, la problématique des modalités d'acquisition des connaissances par les électriciens et leur investissement dans l'innovation bas carbone reste relativement inexplorée, bien que quelques références aux collaborations en tant que levier d'introduction soient occasionnellement mentionnées. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le rapport « Stratégie de déploiement en Europe des énergies des vagues et des marées » publié en juin 2014 par l'initiative stratégique pour les énergies marines¹³¹ qui se borne à souligner que « l'innovation et le développement technologique doivent être renforcés par le biais d'une démarche de collaboration forte entre l'industrie, les centres de recherche, les Etats membres et les organisations de la Commission européenne » et recommander que « les programmes de R&D seront adaptés au fil du temps aux besoins de l'industrie et concentrés sur des problèmes urgents ». Une recommandation pertinente, dont nous pouvons juste regretter qu'elle ne tienne compte ni du processus d'acquisition des connaissances spécifiques aux énergies marines, ni de la dynamique industrielle qui lui est propre.

Il s'agit, donc, ici de distinguer l'engagement du secteur pour chacun de ces domaines technologiques, en commençant par ceux de l'addition, puis ceux de substitution, et les degrés d'ouverture respectifs de leur démarche d'acquisition des connaissances. Le processus sera identique pour chacun des cinq domaines étudiés. Tout d'abord, nous effectuerons un bref rappel de l'histoire du développement de la technologie en question, (en pointant la diversité des sous segments qu'elle englobe, lorsque cela est pertinent), assorti des enjeux et des obstacles qu'elle rencontre lors de son introduction. Puis, nous présenterons les résultats tirés du retraitement des données relatives aux brevets et aux projets, et l'analyse consécutive du niveau de priorité technologique et des modalités d'acquisition des connaissances qu'ils impliquent.

¹³⁰ A titre d'exemple, dans le Plan Stratégique pour les Technologies Énergétique dispositif en charge de favoriser la transformation du système énergétique européen publié en 2009, par la Commission européenne, il est formulé que l'UE doit « passer [son budget] de 3 milliards d'euros par an actuellement à environ 8 milliards d'euros par an pour faire progresser efficacement les actions proposées ».

¹³¹ L'initiative stratégique pour les énergies marines (Ocean Energy) est une association dont le rôle est de fédérer les acteurs des énergies des mers et de favoriser les interactions avec les institutions européennes.

2.1 LES DOMAINES RELEVANT DE L'ADDITION TECHNOLOGIQUE

Deux constats majeurs ressortent de la section précédente : d'une part, les innovations relevant de l'addition technologique sont explorées dans des proportions supérieures à celles de substitution, et, d'autre part, leur démarche, quant à l'acquisition des connaissances, est nettement plus ouverte.

Chacun des trois domaines relevant de l'addition technologique relève, cependant, d'une problématique qui lui est propre. Tout d'abord, la fission nucléaire¹³² qui est, contrairement aux autres technologies étudiées, déjà mature et largement diffusée¹³³, mais, aujourd'hui, l'objet de nombreuses controverses, ravivées par la récente catastrophe de Fukushima. De ce fait, en Europe la fission nucléaire voit son développement freiné¹³⁴, contrairement, toutefois, au reste du monde qui continue de mener une politique de croissance soutenue. Deuxièmement, le CCS, qui présente l'avantage de limiter les émissions de CO₂ des centrales thermiques existantes (gaz et charbon) mais pose un double problème de compétitivité - le coût du dispositif de captage est aujourd'hui significativement plus élevé que le prix du marché de CO₂, et d'acceptation sociale - les parties prenantes se montrent particulièrement soucieuses des risques potentiels encourus lors du transport et de la séquestration. Troisièmement, les réseaux appelés à devenir communicants et connectés (les smart grids) : si l'acheminement de l'électricité constitue le cœur de métier du secteur électrique, l'ajout de dispositifs tels que des capteurs, des systèmes de communication et des logiciels remet en cause la composition de la chaîne de valeur et redéfinit le rôle des électriciens dans cette nouvelle configuration. Une question d'autant plus complexe qu'elle englobe un vaste champ de sujets comme l'interconnexion frontalière, l'introduction des énergies renouvelables ou les nouveaux usages de l'électricité, et encore compliquée par le caractère systémique constitutif de cette technologie.

Les études de cas devraient permettre d'embrasser la recomposition du paysage industriel du secteur électrique et la « place » occupée par les différents acteurs en son sein. Et de comprendre pourquoi la démarche d'acquisition des connaissances et le degré d'ouverture sont, comme on l'a constaté précédemment, plus intenses que dans le cas des technologies de substitution - tout en restant à l'affût des caractéristiques communes aux différentes technologies.

¹³² Si la fusion nucléaire peut représenter une véritable « révolution » énergétique, son stade de développement est encore trop faible pour envisager une étude approfondie de ce domaine.

¹³³ La maturité des domaines technologiques a été présentée dans le Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

¹³⁴ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

2.1.1 La fission nucléaire

Initialement développé à des fins militaires pendant la Seconde guerre mondiale, le nucléaire s'est, depuis les années 1950, converti au civil pour produire de l'électricité. L'énergie nucléaire est une énergie plutôt « bon marché »¹³⁵, qui ne génère pas de CO₂, raisons pour lesquelles l'AIE estime qu'il pourrait contribuer à réduire les émissions de 8%, dans un scénario où la température ne dépasserait pas 2°C à horizon 2050 (AIE, 2015b). La catastrophe de Fukushima, en 2011, a pourtant sensiblement changé la donne : on a vu plusieurs pays européens se décider à sortir du nucléaire ou, a minima, à en diminuer la part dans leur mix électrique. Si bien que sa croissance devrait, désormais, se voir principalement impulsée par les Etats-Unis, l'Inde et la Chine. Notons, cependant, qu'il n'en fait pas moins l'objet d'une démarche d'innovation particulièrement soutenue au niveau de l'Europe, qui continue de chercher à améliorer la technologie de la fission et à développer celle de la fusion.

2.1.1.1 Eléments de contexte

A l'origine, l'énergie nucléaire civile bénéficie des avancées du nucléaire militaire : en 1940, l'Allemagne met au point un sous-marin fonctionnant avec un réacteur utilisant principalement de l'uranium. En 1941, les Etats-Unis contre-attaquent en accélérant leurs recherches sur la création d'une arme nucléaire : c'est le projet Manhattan, soutenu par plusieurs physiciens, dont Einstein, et mené sous la direction du Président Roosevelt. Avec, en août 1945, les tristes conséquences qu'on connaît : les bombardements d'Hiroshima (bombe à base d'uranium) et de Nagasaki (bombe à base de plutonium).

Comme nous l'avons vu précédemment¹³⁶, la France s'est dotée dès la fin de la seconde guerre mondiale du Commissariat à l'Energie Atomique afin d'en développer les applications aussi bien civiles que militaires. Quelques années plus tard, en décembre 1953, le Président américain Eisenhower prononce le discours « *Atoms for Peace* » devant l'ONU, qui prône l'évolution de l'usage de l'énergie nucléaire, jusque-là exclusivement réservée au domaine militaire, à des fins civiles et pacifiques pour «servir les besoins plutôt que les craintes de l'humanité». La Génération I de réacteurs nucléaires est lancée en 1951 aux Etats-Unis, avec la mise en service du réacteur expérimental EBR1 d'une puissance de 100 kW. En France, le réacteur G1 est activé à Marcoule en 1956, précédant, de peu, l'installation des réacteurs G2 et G3 en 1959, tous trois fonctionnant à l'uranium naturel, (l'uranium enrichi viendra par la suite). Entre 1970 et 1990, naît la Génération II de réacteurs qui correspond à la majorité des réacteurs en exploitation aujourd'hui dans le monde. La technique utilisée est la « fission », soit la projection d'un neutron sur un atome lourd instable (uranium 235 ou plutonium 239) qui éclate en deux atomes plus légers. L'éclatement suscite produit de l'énergie, des

¹³⁵ Cf. Chapitre I, section [1.1.2 Des transitions à intervalles rapprochés](#) pour une présentation des coûts de production de l'électricité.

¹³⁶ Cf. Chapitre I, section [1.3.1 La sécurité énergétique](#).

rayonnements radioactifs et génère des neutrons, lesquels provoquent, à leur tour, une réaction de fission par un mécanisme de réaction en chaîne.

Le choc pétrolier de 1973 a joué un rôle de catalyseur dans le développement de l'énergie nucléaire civile. Pour limiter la dépendance aux énergies fossiles, les mix énergétiques se voient diversifier, et incluent, dès lors, une part de plus en plus importante d'électricité nucléaire, qui passe de 3% en 1973 à 17,5% en 1991. Selon la base PRIS de l'Agence Internationale pour l'Energie Nucléaire, en janvier 2016, 441 réacteurs nucléaires sont opérationnels dans le monde, soit une puissance totale de 384 GW. Le New Policy Scenario¹³⁷ publié par l'AIE (2015a) prévoit des capacités nucléaires installées de l'ordre de 614 GW en 2040, soit une contribution à hauteur de 8% à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En 2008, 15 États membres¹³⁸ de l'UE utilisent le nucléaire dans la production d'électricité, 146 centrales nucléaires sont en activité sur le territoire, et l'énergie nucléaire compte pour 15 % de l'électricité produite en Europe. Avec une part de 75% d'électricité d'origine nucléaire en 2015, la France se place au premier rang, suivie par la Belgique et la Slovaquie (plus de 50%). Le premier producteur mondial d'électricité, EDF, est une entreprise française et en 2010 la filière française du nucléaire ne compte pas moins de 53 grandes entreprises, 89 ETI, quatre exploitants et 132 PME¹³⁹.

Les applications civiles de l'énergie nucléaire sont controversées, principalement en raison des risques d'accident de réacteurs et de la question de la gestion des déchets radioactifs à très long terme. En trente ans, la planète a eu à déplorer trois catastrophes d'envergure : en 1979 dans la centrale Three Miles Island en Pennsylvanie, à Tchernobyl en 1986, et en 2011 à Fukushima à la suite du tsunami et du tremblement de terre. La catastrophe de Fukushima a ravivé les réserves, au point de déclencher dans plusieurs pays un désengagement plus ou moins prononcé de la filière¹⁴⁰. C'est le cas de l'Allemagne qui a voté en 2011 la sortie du nucléaire d'ici 2020, ou de la Suède, où le nucléaire génère 40% de la production d'électricité, que le gouvernement a proposé de remplacer par des énergies renouvelables. En France, l'Assemblée Nationale a voté en 2014 la diminution de 75 à 50% de sa part dans la production électrique d'ici 2025. Les marchés les plus actifs dans le domaine du nucléaire sont désormais les Etats-Unis, l'Inde et la Chine : dans ces conditions, les débouchés du nucléaire pour les électriciens européens ressortent aujourd'hui davantage de l'export que des marchés domestiques.

Les retards significatifs que subissent plusieurs projets stratégiques contribuent encore davantage à altérer la confiance des parties prenantes dans cette filière. A Flamanville, trois incidents survenus au cours du premier semestre de l'année 2015 ont conduit à reporter les travaux. En juillet 2015, outre des défauts de soudure détectés sur le circuit primaire, l'Institut

¹³⁷ Ce scénario prend en compte les réglementations votées jusqu'à mi 2015 ainsi que les contributions nationales volontaires soumis par les Etats dans le cadre de la COP 21.

¹³⁸ La Belgique, la Bulgarie, la République tchèque, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Hongrie, la Lituanie, les Pays-Bas, la Roumanie, la Slovaquie, la Slovénie, l'Espagne, la Suède et le Royaume-Uni.

¹³⁹ http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/conseil-national-industrie/PDF/CSFN-cartographie.pdf.

¹⁴⁰ Nous documenterons les cas particuliers de l'Allemagne, de la France, de l'Espagne et de l'Italie dans le Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

de Sûreté nucléaire a relevé des difficultés de fonctionnement, notamment sur les soupapes du réacteur. En avril 2015, de « sérieuses » anomalies au niveau de la cuve ont été repérées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire. En conséquence de ces alertes à répétition, l'EPR ne devrait tourner à plein régime qu'en 2018, soit onze ans après la date initialement prévue. Avec des conséquences de coût, puisque les travaux ont été réévalués début 2014 à 8,5 Md€, soit un montant presque trois fois supérieur celui annoncé lors de son lancement. On pourrait également citer le cas de la construction de l'EPR du site d'Olkiluoto, en Finlande, qui cumule neuf ans de retard, ce qui représente près de 4 Md€ de pertes pour Areva.

Même constat concernant la fusion¹⁴¹ nucléaire avec le projet Iter, où retards et coûts excessifs sont également à déplorer. Ce projet de recherche d'envergure internationale qui mobilise l'Union européenne, les Etats-Unis, la Chine, le Japon, la Russie, l'Inde et la Corée du Sud, vise à tester la « faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme nouvelle source d'énergie ». L'enjeu est stratégique, puisque la fusion permettrait de produire une énergie dix fois supérieure à celle générée par la fission, à masse de combustible identique, tout en générant moins de déchets et en s'appuyant sur des ressources en énergie quasiment illimitées. La construction de l'infrastructure, qui a débuté en 2010, devait initialement s'étendre sur dix ans. Après dix années supplémentaires de tests, les premiers résultats expérimentaux devaient permettre de préciser le dimensionnement du réacteur, et à compter de 2040, on envisageait encore une décennie de plus pour achever le programme scientifique et technologique. Malheureusement, après seulement cinq ans de travaux, le budget du projet a grimpé de 5 à 16 Md€ et un retard de plus de trois ans par rapport au calendrier initial s'est déjà accumulé. Il est donc fort peu probable que la technologie de fusion soit disponible avant 2060, ce qui l'évince naturellement des technologies bas carbone disposant d'un impact sur la trajectoire des émissions de CO₂.

La situation en Europe est donc la suivante : dans une ambiance de défiance matérialisée par des politiques de limitations ou de désengagements au niveau national, la Commission européenne investit pourtant généreusement dans la R&D de la technologie pour maintenir son leadership mondial dans une optique d'export vers des pays tels que l'Inde, la Chine ou les Etats-Unis (AIE, 2015a). Dans cette logique, elle soutient, à la fois, les travaux portant sur la fusion dont le déploiement ne pourrait être envisagé qu'à très long terme (au-delà de 2050), et les recherches scientifiques concernant l'amélioration de la technique de fission actuellement utilisée, et qui contribuera, pour partie, à limiter, dans les années à venir, les émissions de CO₂.

Le montant total des investissements publics et privés nécessaires en Europe ces dix prochaines années pour développer la fission nucléaire est estimé à 7 Md€ par la Commission européenne (2013a). Dans le cadre du 7^{ème} PCRD, l'Europe consacre 2,7 Md€ à la recherche, ainsi répartis : 1,9 Md€ pour la fusion (à travers le soutien du projet Iter), 517 M€ pour les activités du JRC et 287 M€ pour la fission, dont les principaux enjeux sont ceux de la gestion

¹⁴¹ La fusion consiste à rapprocher deux atomes d'hydrogène (deutérium et tritium) à des températures de plusieurs millions de degrés, comme au cœur des étoiles. Lorsque ces noyaux légers fusionnent, le noyau créé se retrouve dans un état instable. Il tente de retrouver un état stable en éjectant un atome d'hélium et un neutron et crée alors de l'énergie.

des déchets et l'amélioration des réacteurs en termes de sécurité et de durabilité. Globalement, les travaux poursuivent deux objectifs : permettre aux acteurs européens de conserver leur avantage compétitif sur les marchés Asie et Amérique, les deux principaux lieux de croissance, et, au regard des réserves dont la filière fait l'objet, renforcer la sécurité des installations existantes. De plus, nous pouvons citer la Plateforme Technologique pour une Energie Nucléaire Durable¹⁴² lancée en 2007, dont la mission est de renforcer le leadership de l'Europe à travers un programme de R&D de long terme sur les générateurs de IIème, IIIème et IVème génération. En mars 2015, la plateforme compte 115 membres : centres de recherche, industriels producteurs d'électricité et PME. Il est intéressant de noter que les PME représentent seulement 6% des membres, du fait de la maturité de la technologie.

Rappelons, enfin, trois particularités spécifiques au nucléaire, propres à éclairer certaines observations ressorties de l'étude de cas : sa maturité avancée, son faible niveau de concentration en innovation, et l'absence de jeunes entreprises innovantes en mesure d'apporter de l'innovation¹⁴³.

Trois questions centrales découlent logiquement de ces spécificités et du contexte observé : quel besoin en actifs complémentaires pour cette technologie d'intensité capitalistique, mature et largement diffusée ? Dans le cadre d'une compétition féroce et à l'échelle internationale, quel niveau de collaboration peut-il s'autoriser quant au partage des connaissances ? Et enfin, l'innovation est-elle générée principalement en interne ou s'appuie-t-elle sur l'écosystème ? Autant de zones d'ombre que l'analyse des données établie à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits lors du 7^{ème} PCRD devrait contribuer à éclaircir.

2.1.1.2 Analyse de l'introduction à l'échelle du secteur électrique européen

L'indicateur de mesure de l'intensité de l'engagement du secteur électrique dans chacune des technologies étudiées¹⁴⁴ place le nucléaire en troisième position, et bonne dernière des technologies d'addition : lors du 7^{ème} PCRD, les électriciens concernés se sont engagés dans 29 projets de ce domaine, soit 23% du portefeuille total, pour un montant global de 230 M€. La Commission européenne contribue, pour sa part, à hauteur de 84 M€, soit un taux de financement de 47%, faisant, là encore, de la fission nucléaire la technologie la moins soutenue des technologies étudiées – ce qui peut aisément s'expliquer par son degré de maturité élevé. Et entre 2007 et 2013, seulement 45 brevets ont été déposés, soit environ 16% du nombre total. Si ces chiffres témoignent d'un engagement, certes, indéniable, ils masquent pourtant l'impasse technologique faite par la moitié des acteurs¹⁴⁵ sur la fission. Le chapitre suivant approfondira les stratégies respectives de chacun des électriciens en la matière, mais il est, d'ores et déjà, important d'indiquer qu'aucun électricien qui n'est pas déjà présent sur cette filière ne s'engage dans des travaux de R&D à son endroit. Ce qui, encore une fois,

¹⁴² <http://www.snetp.eu/members/>.

¹⁴³ Cf. Chapitre IV, section [1.Comparaison des domaines technologiques](#).

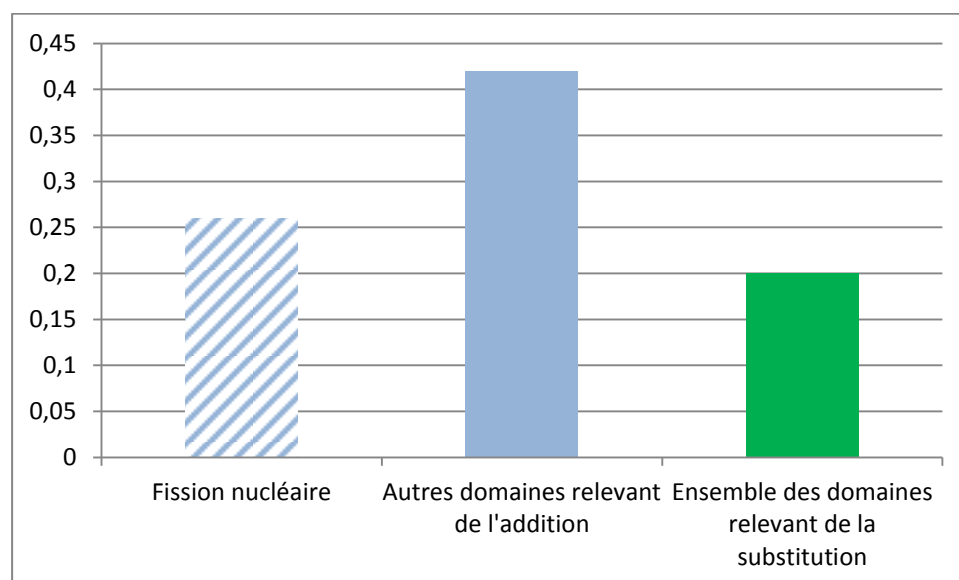
¹⁴⁴ Cf. Chapitre IV, section [1.Comparaison des domaines technologique](#).

¹⁴⁵ Cf. Chapitre V, section [2.Etudes de cas](#) qui présente l'engagement des six électriciens dans chacun des domaines technologiques.

résulte de sa nature « capital-intensive » et de sa maturité : le coût d'entrée, tant en termes d'investissement que de savoir-faire, est trop élevé pour que de nouveaux acteurs ne s'y aventurent. Un résultat qui découle, tout à la fois, du positionnement de l'Europe - qui ne souhaite pas installer de nouvelles capacités sur son territoire - du niveau trop relevé de la compétition pour commercialiser des centrales à l'export et du niveau d'investissement initial trop conséquent pour qu'un nouvel acteur puisse s'y risquer avec succès.

L'indice mesurant le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances révèle que la fission nucléaire est, de toutes les technologies d'addition, celle qui présente la démarche d'ouverture la plus faible¹⁴⁶ : la fission nucléaire se rapproche, sur ce critère, davantage des technologies de substitution.

Figure 45 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances dans le domaine de la fission nucléaire avec celui observé pour les autres domaines relevant de l'addition technologique et l'ensemble des domaines relevant de la substitution.

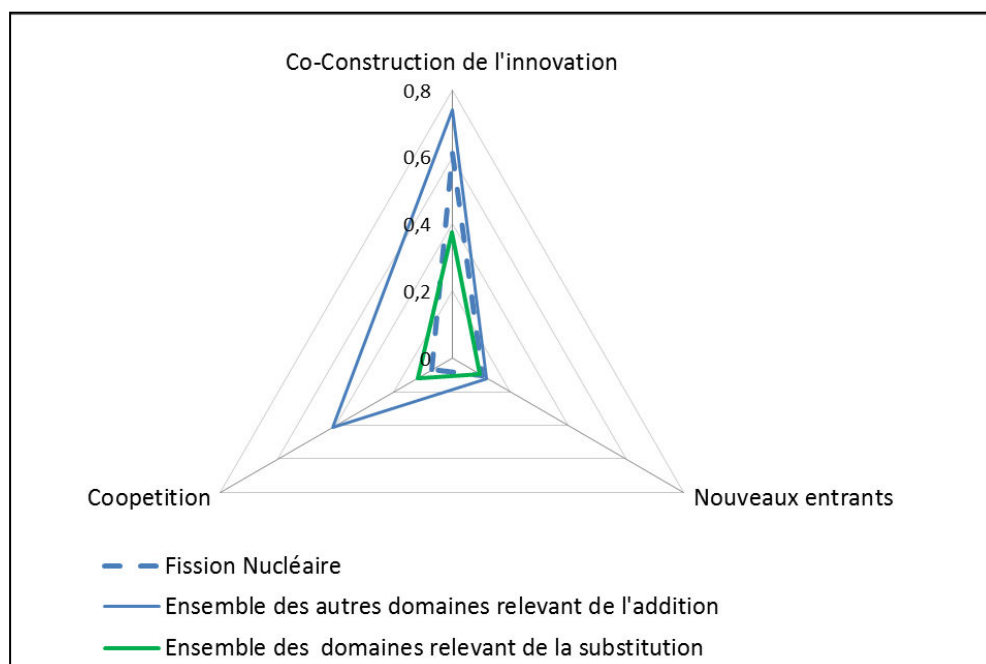


Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

Le niveau de coopération est particulièrement bas et bien en-deçà de celui observé pour les autres domaines relevant de l'addition, et, une fois encore, plus proche de celui des technologies de substitution. Le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants est, pour sa part, comparable à celui des autres domaines de l'addition - et de l'ensemble des technologies de substitution. En revanche, le niveau du critère « Co-construction de l'innovation » est plutôt élevé par rapport à celui des technologies de substitution mais relativement faible par rapport à celui des autres domaines d'addition. Il est supérieur à 0,5, ce qui signifie que la co-construction de l'innovation avec les parties prenantes est privilégiée à une génération interne de l'innovation.

¹⁴⁶ Cf. [Figure 43 : Classement des domaines technologiques en fonction du niveau d'ouverture de leur stratégie d'acquisition des connaissances.](#)

Figure 46 : Comparaison du niveau des critères d'ouverture de la fission nucléaire avec ceux des autres domaines relevant de l'addition et ceux de l'ensemble des domaines relevant de la substitution.



Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

Différents facteurs justifient ces résultats. Premièrement, la fission nucléaire est une technologie mature dont l'innovation est particulièrement peu concentrée¹⁴⁷ ; le secteur n'est donc pas engagé dans « une course aux brevets », et les interactions avec l'écosystème sont systématiquement privilégiées. Néanmoins, lancés dans une compétition à l'échelle internationale, les électriciens ne s'inscrivent pas dans une démarche de coopération en participant à des projets collaboratifs. Enfin, dans la mesure où la fission nucléaire est une technologie mature et largement déployée, la filière ne nécessite pas, outre mesure, la présence de nouveaux entrants pour apporter des actifs complémentaires.

2.1.1.3 Conclusion

La fission nucléaire est la technologie relevant de l'addition qui fait, à la fois, l'objet du niveau d'engagement le plus faible et de la démarche d'acquisition des connaissances la moins ouverte. Le niveau d'engagement particulièrement bas s'explique par le fait, qu'en Europe, le nucléaire fasse l'objet d'un désengagement plus ou moins marqué, qu'il nécessite des capitaux élevés et qu'il s'agisse d'une technologie dont les leaders ont déjà émergé à l'échelle internationale. Il serait donc périlleux que des électriciens novices ne s'engagent dans une compétition internationale particulièrement intense (la croissance du marché du nucléaire devrait être inférieure à celle des autres domaines technologiques, en particulier

¹⁴⁷ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

celle promise aux énergies renouvelables). Ce niveau de compétition permet également de comprendre la démarche d'acquisition des connaissances plutôt fermée, par rapport aux autres domaines relevant de l'addition. Caractérisée par un niveau de coopétition limité entre électriciens, symptomatique d'une volonté de freiner la circulation des connaissances et par une démarche de co-construction de l'innovation inférieure aux autres domaines relevant de l'addition, elle voit cependant ses interactions avec les parties prenantes privilégiées à la génération interne de l'innovation, révélatrices du fait, qu'à l'échelle du secteur, les électriciens ne soient pas engagés dans une course aux brevets.

2.1.2 Le captage et le stockage du carbone

Le CCS consiste à capter le dioxyde de carbone émis à l'occasion de la combustion d'énergie fossile, le transporter et, in-fine, l'injecter dans des formations géologiques ou océaniques telles que des champs de pétrole ou de gaz épuisés. Cette technologie trouve des applications dans le secteur électrique et dans différentes industries, comme la production de ciment ou d'acier. La mise en place de technologies de captage du carbone permettrait de réduire de 85 à 95% les rejets des centrales au charbon et au gaz (CE, 2011a), mais, bien que l'Europe soutienne activement le CCS, cette technologie reste controversée dans un certain nombre de pays européens.

Le CCS est en mesure de contribuer significativement à la lutte contre le réchauffement climatique, et les bases de données du Global CCS Institute¹⁴⁸ et celles du MIT¹⁴⁹ sont, à cet égard, significatives de la vitalité de la recherche en ce domaine, qui se confronte, pourtant, à des problèmes de coût et de sécurité. La question de sa place dans la transition énergétique du secteur électrique reste complexe, comme en témoigne l'analyse des projets élaborés dans le cadre du 7^{ème} PCRD et des brevets déposés par le secteur électrique sur la période 2007-2013.

2.1.2.1 Eléments de contexte

A l'échelle mondiale, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2015b) estime que, d'ici 2050, le CCS pourrait contribuer à réduire de 14% des émissions de CO₂, soit 1/5 des réductions d'émission indispensables pour contenir le réchauffement climatique sous la barre critique des 2°C. Au niveau européen, le déploiement du CCS devrait s'accroître à partir de 2020, afin de tenir l'objectif global que s'est fixé l'Europe (diminution de 60 à 80 % des émissions de CO₂ d'ici 2050). La feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 (CE, 2011b) envisage que la part des centrales utilisant le CCS pourrait augmenter jusqu'à 32 % dans le secteur de la production d'électricité ; la Commission européenne (2013a) indique qu'au regard de la réglementation en vigueur en 2013 et sur la base de l'EU Reference Scenario 2013 (construit avec le modèle PRISMES), la capacité de production électrique capturant le carbone pourrait représenter 38 GW à horizon 2050, ce qui nécessiterait une capacité de stockage de 670 Mt CO₂. Afin de faciliter l'adoption de cette technologie, l'Union européenne a adopté en 2009 une directive¹⁵⁰ visant à garantir que la technologie CCS puisse être utilisée en toute sécurité et à prévenir et supprimer tout risque pour l'environnement et la santé humaine.

Le captage du CO₂ peut être réalisé selon trois procédés. Le plus récent d'entre eux, l'oxycombustion, repose sur la suppression du diazote des fumées grâce à l'utilisation du

¹⁴⁸ <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>.

¹⁴⁹ http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_capture.html.

¹⁵⁰ La directive 2009/31/CE relative au stockage géologique du CO₂ précise que « l'objectif du stockage géologique du CO₂, en toute sécurité pour l'environnement, est le confinement permanent du CO₂ de façon à prévenir et, lorsque cela est impossible, à supprimer le plus possible les effets néfastes et tout risque pour l'environnement et la santé humaine ».

dioxygène pur à la place de l'air dans le processus de combustion. Les fumées qui en émanent se composent, alors, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau, et on peut dès lors éliminer l'eau par condensation, et isoler puis capturer le dioxyde de carbone. Deuxième technique, la pré-combustion consiste à traiter les énergies primaires fossiles en amont de leur combustion en les gazéifiant dans un réacteur en présence d'air, de vapeur d'eau ou d'oxygène pur, pour produire du syngaz. La pression et la concentration du gaz carbonique facilitent, alors, la séparation du CO₂ et de l'hydrogène. Troisième méthode, la post-combustion permet d'extraire le CO₂ dilué dans les fumées de combustion grâce à un solvant chimique qui réagit à son contact. Le CO₂ est, ensuite, séparé du solvant via un processus de régénération thermique.

La démarche consistant à capter et stocker le carbone est récente et n'a pas encore fait l'objet d'un déploiement à grande échelle¹⁵¹. On peut, toutefois, en apprécier le développement, et les enjeux, en s'appuyant sur les données du Global CCS Institute¹⁵² et celles du MIT¹⁵³.

En 2015, le Global CCS Institute recense, à travers le monde, 55 projets CCS (dont seulement 14 sont opérationnels) de grande capacité¹⁵⁴ au potentiel cumulé de captage de 84 Mt CO₂ par an. Parmi ces projets, 22 concernent le secteur électrique, et s'appuient principalement sur les techniques de pré-combustion (10 projets) et de post-combustion (9 projets), contre seulement 3 pour l'oxycombustion, ce qui s'explique aisément par l'antériorité des deux premiers. Cette répartition reste en ligne avec la répartition des techniques observée au niveau mondial. D'un point de vue géographique, six projets sont menés en Europe : cinq au Royaume-Uni et un aux Pays-Bas.

La base de données du MIT répertorie 21 projets à l'échelle mondiale pour le secteur électrique dont sept en Europe (cinq au Royaume-Uni et deux aux Pays-Bas). Remarquons que les coordinateurs des projets sont principalement des électriciens et que, seulement, un d'entre eux est dirigé par une jeune entreprise spécialisée dans le captage du carbone. Le MIT souligne, par ailleurs, que pas moins de 14 des projets européens ont été annulés ou reportés. Outre la question du manque de financement des entreprises, le motif le plus fréquent vient des décisions juridiques qui refusent d'accorder des autorisations de procéder à des opérations de captage, transport et stockage du CO₂.

Les organisations environnementales exercent une pression régulière sur les gouvernements en pointant du doigt les risques présentés par le CCS, qui constituent, aujourd'hui, un enjeu d'acceptabilité sociale. Le captage et le stockage du CO₂ ont, ainsi, été interdits sur une partie du territoire belge, luxembourgeois et finlandais, au motif que les sols étaient inadaptés à la séquestration du dioxyde de carbone, et totalement prohibés en Autriche et en Slovaquie. En Allemagne, la quantité annuelle de carbone séquestré est plafonnée à hauteur de quatre millions de tonnes.

¹⁵¹ Le premier projet de démonstration de captage et de stockage du CO₂ a vu le jour il y a moins de vingt ans, dans le champ gazier norvégien de Sleipner en 1996.

¹⁵² <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>.

¹⁵³ http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_capture.html.

¹⁵⁴ Un projet de CCS à grande échelle est défini comme un projet permettant de capter a minima 800 000 tonnes de CO₂ par an.

Le coût du CCS dépend de la composition des fumées, du volume à traiter et du procédé de captage, partie la plus onéreuse de l'opération, devant le transport et le stockage. Les analystes économiques estiment, en effet, que le coût moyen du captage est compris dans une fourchette oscillant entre 60 et 90 € par tonne de CO₂ pour une centrale thermique de 500 MW, ce qui se traduit par une augmentation de 50 à 70 % du coût de production du kWh électrique. Dans un contexte où le prix de marché du CO₂ est particulièrement bas¹⁵⁵, le CCS peine à être compétitif, ce qui freine sérieusement son adoption. Néanmoins, la modélisation réalisée par la Commission européenne (2013a) sur la base PRISMES qui projette un prix du marché des quotas de l'ordre de 35 € par tonne de CO₂ en 2030, pourrait, à cet égard, changer la donne. Le 12 janvier 2015, quatre grands énergéticiens européens, EDF, RWE, Vattenfall et Gas Natural Fenosa, se sont, toutefois, retirés du projet « plate-forme zéro émission » (ZEP¹⁵⁶), au motif qu'ils ne disposent pas actuellement en Europe d'un cadre économique suffisamment incitatif pour faire du CCS une technologie attractive pour l'investissement ; un épisode révélateur de la forme de collaboration politique qui peut s'instaurer entre électriciens, qui peinent à voir se mettre en place un cadre réglementaire propice à l'introduction du CCS.

Si, pour certains électriciens, les conditions restent insuffisantes pour s'investir outre mesure dans le CCS, la Commission européenne s'active pourtant à soutenir son développement. La feuille de route rédigée en 2011 (CE, 2011b) souligne la nécessité de déployer, à grande échelle, les technologies du CCS et programme à cet effet un investissement annuel de plus de 10 Md€. Des guichets de financement complémentaire ont également été mis en place, notamment, via le European Energy Program for Recovery (EEPR) et le NER 300, pour soutenir des démonstrateurs dans l'optique d'une activité commerciale, et via le Programme Cadre de Recherche et Développement destiné à des unités de plus petite taille. Le NER 300, un instrument financier géré conjointement par la Commission européenne, les Etats membres et la Banque Européenne d'Investissement, a été créé dans le but de financer des démonstrateurs de CCS et des projets innovants dans le domaine des énergies renouvelables. Il dispose d'un budget de 300 M€ provenant de la réserve des nouveaux entrants au titre de la vente des quotas d'émissions. Mais, alors qu'il était initialement prévu que 22 projets CCS soient financés, seulement quatre l'ont finalement été (dont deux annulés par la suite). L'EEPR, doté, pour sa part, de 1 Md€, subventionne des projets en Pologne, en Allemagne, aux Pays-Bas, en Espagne, en Italie et au Royaume-Uni. Mais, là encore, sur les six projets sélectionnés en 2009 par la Commission européenne, quatre ont été annulés pour des raisons de coût et d'acceptabilité sociale.

Si les bases de données du MIT et du Global CCS Institute sont précieuses pour observer le développement du CCS et les obstacles qu'il rencontre du fait de son coût élevé et du potentiel risque environnemental, elles ne détaillent, en revanche, ni la nature des interactions des électriciens entre eux, ni celles établies avec les nouveaux entrants. Dans ces circonstances, il est difficile de comprendre dans quelle mesure les électriciens privilégient des relations de compétition ou de collaboration, s'appuient ou non sur de nouveaux entrants

¹⁵⁵ Cf. Chapitre II, section [2.1 La place des autorités publiques dans les transformations énergétiques](#).

¹⁵⁶ L'objet de cette plateforme est de constituer un espace de dialogue entre l'industrie du captage et du stockage du carbone et la Commission européenne (<http://www.zeroemissionsplatform.eu/>).

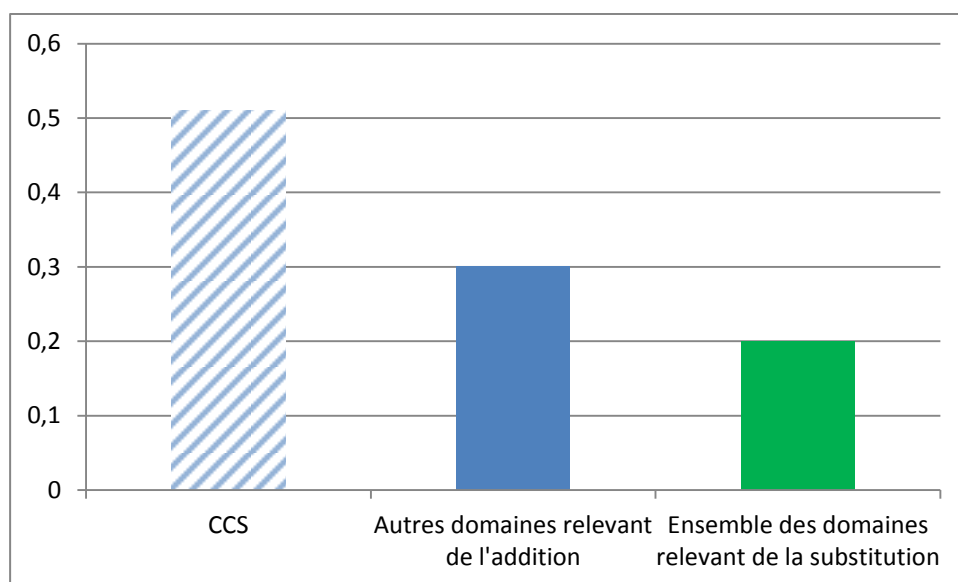
pour développer l'innovation – autant de questions que devraient éclairer l'analyse des brevets et des projets.

2.1.2.2 Analyse de l'introduction à l'échelle du secteur électrique européen

L'analyse de la stratégie technologique au niveau du secteur électrique désigne expressément le CCS comme la technologie la moins explorée par les électriciens¹⁵⁷, et, cela, que l'on se situe sur le périmètre des technologies d'addition ou sur l'ensemble des domaines étudiés. Lors du 7^{ème} PCRD, les électriciens étudiés se sont engagés sur 15 projets relatifs au CCS, pour un montant total de 132 M€. La Commission européenne contribue, quant à elle, à hauteur de 84 M€, soit un taux de financement de 64%, ce qui place le CCS à la deuxième place en termes de soutien européen, derrière les énergies renouvelables, et confirme la priorité que représente, pour elle, cette technologie. Par ailleurs, on remarque qu'entre 2007 et 2013, seulement 4 brevets ont été déposés, classant le CCS au dernier rang sur cette période.

L'analyse des collaborations met en évidence le degré d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances, le plus élevé des domaines d'addition mais aussi de l'ensemble des technologies étudiées (Figure 47).

Figure 47 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances dans le domaine du CCS avec celui observé pour les autres domaines relevant de l'addition technologique et l'ensemble des domaines relevant de la substitution.



Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

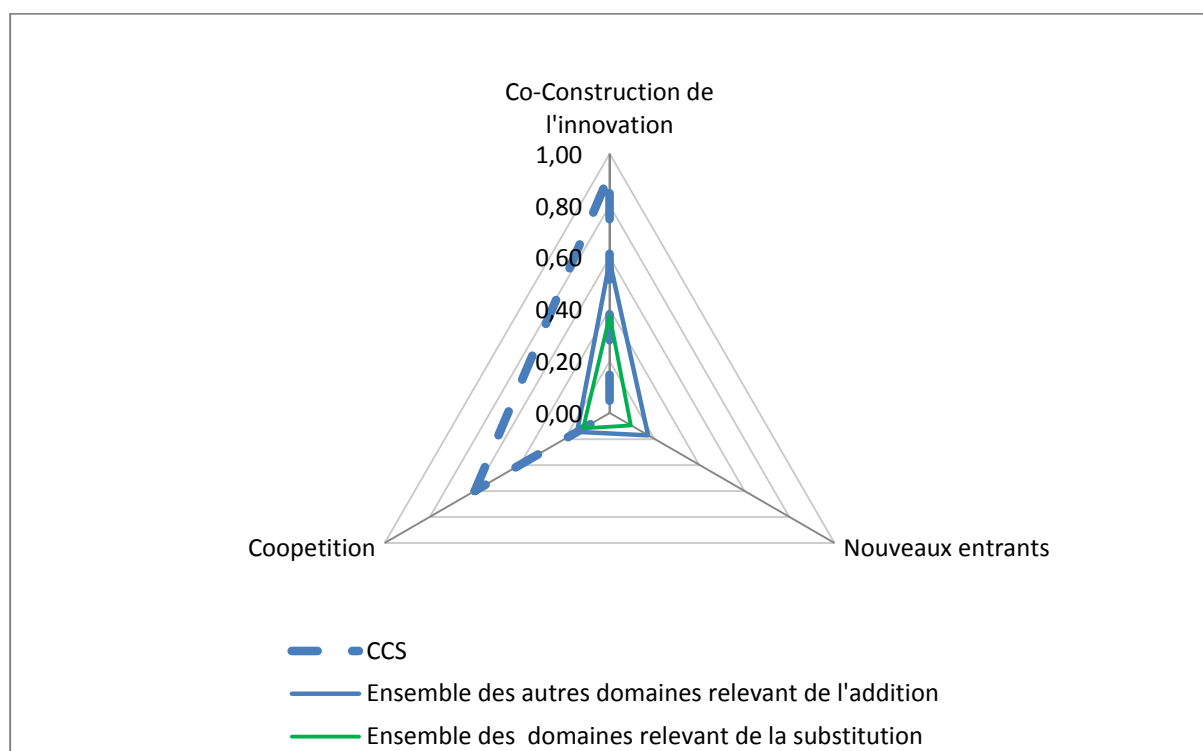
Selon l'indicateur des critères d'ouverture, le CCS se singularise par son très faible niveau de collaboration avec les nouveaux entrants qui contraste avec son niveau considérable de coopération et de co-construction de l'innovation. Celui-ci est, en effet, amplement supérieur à

¹⁵⁷ Cf. Figure 40 : [Intensité de l'engagement du secteur dans les domaines technologiques](#).

0,5 ce qui signifie que la co-construction de l'innovation avec les parties prenantes est largement privilégiée à la génération interne de l'innovation.

Alors qu'il a été observé plus haut que les technologies d'addition se distinguaient des technologies de substitution par leur indice élevé de coopération, en contradiction avec leur faible niveau de collaboration avec les nouveaux entrants¹⁵⁸, l'analyse du CCS permet d'affiner cette première conclusion. En l'excluant du calcul, les technologies d'addition se retrouvent à un niveau de coopération comparable à celui des technologies de substitution : c'est le seul fait du CCS qui permet d'établir une distinction entre les technologies relevant de l'addition et de la substitution sur la base de ce critère. Hors CCS, il apparaît, également, que les technologies d'addition relèvent d'un niveau de collaboration avec les nouveaux entrants supérieur à celui des technologies de substitution.

Figure 48 : Comparaison du niveau des critères d'ouverture du CCS avec ceux des autres domaines relevant de l'addition et ceux de l'ensemble des domaines relevant de la substitution.



Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

On assiste à une forte détermination à accélérer l'introduction de cette technologie en partageant libéralement les connaissances générées par les différents projets (60% des projets associent au-moins deux électriciens). Une tendance confortée par des chiffres révélateurs d'une politique de co-invention préférée à celle d'une génération en interne (12% du nombre total de projets, mais seulement 2% de l'ensemble des brevets déposés). Les électriciens créent du savoir-faire en participant aux projets, tout en s'appuyant en priorité sur leurs partenaires pour apporter l'innovation. On peut en déduire qu'ils n'envisagent pas que le CCS

¹⁵⁸ Cf. Chapitre IV, section [1.Comparaison des domaines technologiques.](#)

puisse, à ce stade, recéler un quelconque avantage compétitif. Considérant la nature même du CCS, qui consiste à augmenter les performances environnementales par l'adjonction d'un dispositif de captage, la stratégie du secret aurait pu justifier le nombre particulièrement bas de brevets déposés ; théorie de facto invalidée par le niveau de l'indicateur de coopération, le plus élevé de l'ensemble des technologies étudiées, (et qui suggère, au-contre une volonté de partager librement les connaissances).

Un examen approfondi des projets montre que les électriciens expérimentent, en priorité, le segment du captage par rapport à ceux du transport et du stockage. En confirmant la nécessité de se concentrer sur le coût du captage pour rendre la technologie du CCS compétitive, ce résultat est en ligne avec les observations précédentes. En outre, on observe que l'ensemble des technologies de captage (pré-combustion, post-combustion, oxycombustion) sont explorées, attestant, par là même, que la « meilleure » technique ne s'est pas encore imposée, et que les collaborations représentent aujourd'hui le moyen de prédilection pour orienter les choix technologiques, accéder aux connaissances disponibles et participer à la définition des standards. De plus, on constate que ces mêmes collaborations participent à diversifier¹⁵⁹ les techniques de captage, à l'instar du projet Success qui poursuit l'exploration d'un nouveau procédé, dit « Chemical-looping combustion » dont les avantages en termes de performance et de coûts par rapport aux trois autres, seraient significatifs. On remarque, cependant, qu'aucun des projets de recherche du domaine ne porte sur les questions d'acceptabilité sociale ou les leviers susceptibles de l'améliorer, ce qui est surprenant au regard du frein que constitue ce sujet dans la diffusion du CCS.

L'analyse de la composition des consortiums met en avant différents éléments. Tout d'abord, contrairement aux projets recensés dans la base du MIT, aucun électricien n'est coordinateur d'un projet de CCS réalisé dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Ce qui pourrait s'expliquer par le positionnement préférentiel des électriciens, en tant qu'« adopteurs » de technologies - une conjecture qui serait, d'ailleurs, cohérente avec le faible nombre de brevets déposés. Dans la mesure où le CCS a vocation à apporter des solutions à des problèmes partagés par la plupart des électriciens, une démarche de collaboration intense est privilégiée. Mais si, comparativement aux autres technologies, il fait donc l'objet du niveau de collaboration entre électriciens le plus soutenu, c'est, en revanche, celui qui collabore le moins avec les nouveaux entrants. Principalement composés d'adjacents issus du secteur des gaz industriels, ces derniers ne participent pas dans des proportions suffisantes à des projets pour qu'un seul d'entre eux ne soit qualifié d'orienté « Nouveaux entrants »¹⁶⁰. On remarque, également, que les jeunes entreprises ne sont pas représentées dans les consortiums, un constat en phase avec les observations formulées sur la base de l'analyse des opérations en capital, qui relevaient l'absence, en ce domaine, d'investissement dans de jeunes entreprises¹⁶¹. Les principaux participants aux projets CCS se révèlent, en effet, être des acteurs historiques de l'électricité, ce qui s'explique assez logiquement par le fait qu'il s'agisse là de renforcer des dispositifs existants, conçus et connus par les acteurs installés dans le secteur électrique (fournisseurs de

¹⁵⁹ Cf. Chapitre II, section [1. Fondements théoriques de la compétition technologique.](#)

¹⁶⁰ Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

¹⁶¹ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#) où le CCS n'est pas spécifiquement identifiable dans les catégories faisant l'objet d'opérations en capital par les travaux du Cleantech Group.

turbines, installateurs de centrales électriques). On notera, toutefois, la présence d'acteurs historiques de secteurs adjacents (chimie et gaz industriels) dont le savoir-faire est utile pour le captage du CO₂ et pour lesquels le développement du CCS peut être amené à représenter un relais de croissance significatif¹⁶².

2.1.2.3 Conclusion

Dans la mesure où le CCS contribue à la poursuite de l'exploitation des énergies fossiles sans modifier dans son ensemble la chaîne de valeur de l'électricité, le processus d'innovation s'inscrit logiquement dans une démarche d'acquisition des connaissances particulièrement ouverte. Une démarche caractérisée, d'une part, par un processus de co-construction de l'innovation soutenue et, d'autre part, par un fort degré d'intensité des relations entre électriciens. Ils participent de concert aux expérimentations sur les différentes technologies et privilégient la diffusion des connaissances afin de réduire les émissions des centrales thermiques, problématique que partagent l'ensemble des acteurs du secteur. En revanche, on peut s'étonner de constater que le CCS soit la technologie la moins explorée de l'ensemble des domaines technologiques étudiés ; un constat qui fera donc l'objet d'une attention particulière lors des études de cas consacrées à chacun des électriciens¹⁶³, et, en particulier, des plus émetteurs de CO₂.

¹⁶² Cf. [Annexe 6 : Principaux déposants de brevets dans les domaines technologiques étudiés](#) où nous mettons en évidence que les principaux déposants de brevets dans le domaine du CCS sont les acteurs des gaz industriels.

¹⁶³ Cf. Chapitre V, section [2. Etudes de cas.](#)

2.1.3 Les smart grids

Compte tenu l'importance des questions d'intermittence que poseront nécessairement l'introduction des énergies renouvelables et d'une meilleure gestion de la demande, les smart grids constituent un levier complémentaire indispensable pour lutter contre le réchauffement climatique. Ils concernent non seulement l'interconnexion des réseaux entre eux mais également leur évolution, via l'ajout de capteurs, de systèmes de télécommunications et de logiciels : pour rendre les réseaux plus communicants, les acteurs des secteurs NTIC sont appelés à jouer un rôle central, en bouleversant la configuration de la chaîne de valeur de l'électricité. Autant de défis que devrait éclairer l'analyse des brevets déposés entre 2007 et 2013 et les projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD, quant à la réponse du secteur en termes d'engagement et de collaboration à cette configuration inédite. Des enseignements mis en perspective avec les résultats de l'étude de 219 projets smart grids conduite par Giordano et al. en 2011 et par Erlinghen et Markard (2012) ciblée sur le rôle des acteurs des NTIC dans la transformation du secteur électrique. Notons la variété de segments adressés par la technologie smart grids : gestion IT de la demande, véhicule électrique, réseaux et intégration des EnR, gestion bas carbone des bâtiments, compteurs intelligents et stockage¹⁶⁴, dont l'analyse devra tenir compte.

2.1.3.1 Eléments de contexte

Jusqu'à présent, l'équilibre du système électrique était obtenu en « pilotant » l'offre afin de l'adapter à la demande, et, cela, sous contrainte d'optimisation du coût de l'électricité¹⁶⁵. Ce qui correspond à un « état du monde » où la production électrique est centralisée au sein de capacités dotées de puissances importantes et où les flux d'électricité et d'information sont uni-directionnels, du lieu de production vers le lieu de consommation. Or, dans le contexte actuel de transition énergétique, les réseaux, qui ont connu peu de transformations depuis un siècle (Bauknecht, 2012) sont appelés à se renforcer. Ils doivent devenir intelligents et communicants pour tenir compte de l'augmentation soutenue de la production d'électricité d'origine renouvelable, caractérisée à la fois par son intermittence et son niveau de décentralisation. De même, il s'agit d'acquérir une meilleure maîtrise de la consommation électrique en assurant des flux d'électricité et d'information bi-directionnels (Farhangi, 2010), de se densifier pour favoriser les échanges transfrontaliers d'électricité, et de gagner en robustesse pour gérer les appels de charges et leurs variations dus aux nouveaux usages (véhicule électrique, chauffage). Les smart grids devraient permettre de réduire les émissions de l'ordre de 20 Gt CO₂ d'ici 2050 (AIE, 2011).

¹⁶⁴ Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

¹⁶⁵ Comme nous l'avons vu dans le Chapitre I, section [1.1 Caractérisations saillantes des transitions énergétiques de l'ère industrielle](#) : le coût de production de l'électricité varie significativement en fonction de la centrale utilisée.

Pour atteindre ces objectifs, et à l'exception des compteurs intelligents qui ont vocation à se substituer aux compteurs non communicants déjà installés, les trois couches suivantes s'ajouteront au système électrique actuel. Une couche « matériel », qui concerne principalement des capteurs permettant de collecter et recevoir des informations sur les opérations. Une couche « communication » qui va transmettre les informations en amont et en aval. Enfin, une couche « logiciel » en charge d'agréger et d'analyser les données collectées. De nouveaux services énergétiques comme l'effacement, la gestion de la demande et de l'énergie ont déjà commencé à apparaître, amorçant progressivement la modification de la structure de la chaîne de valeur de l'électricité. Les technologies de l'information et des télécommunications sont, dans ce contexte, amenées à jouer un rôle central dans la mise en place des réseaux intelligents, ainsi que divers acteurs, tels que les fournisseurs de matériel communicant, les développeurs de solutions applicatives, les acteurs des télécommunications, aux côtés des entreprises déjà en place.

Les smart grids sont des domaines systémiques « par nature » (Giordano et al, 2011). L'intégration des NTIC transforme le système électrique, qui passe d'une simple infrastructure « physique » à une plateforme de marché offrant une variété de services à des utilisateurs hétérogènes (Valocchi et al, 2010). Comme le souligne Kiesling (2009), un réseau intelligent est « un environnement transactionnel riche, une plateforme de marché, un réseau connectant des producteurs et des consommateurs qui y négocient leur apport mutuel de valeur ». L'auteur conclut que les smart grids sont des réseaux « transactifs ». La mise en place d'une telle plateforme nécessite d'intégrer dans le système, à la fois, une couche physique et une couche de marché. La couche « physique » se réfère à l'infrastructure en mesure d'assurer la sécurité des échanges d'information et d'électricité. La couche « de marché » concerne les mécanismes permettant de coordonner les transactions entre les parties prenantes (opérateurs des systèmes, consommateurs, producteurs...).

Si la plupart des technologies sont d'ores et déjà connues et diffusées dans d'autres secteurs, le succès des smart grids réside dans l'intégration au système de chacune d'entre elles et dans la multiplicité des participants. En effet, les smart grids offrent des « bénéfices systémiques » (Giordano et al 2011) dans la mesure où leur valeur dépend de la participation et des interactions entre les utilisateurs (externalité de réseau) ; plus les membres d'un groupe (consommateurs) vont rallier la plateforme, plus les membres des autres groupes auront intérêt à la rejoindre (distributeur, équipement électronique ou de télécommunication) ; caractère systémique qui tient également au fait que la totalité des bénéfices se révéleront dès lors que l'ensemble du système aura été transformée.

Depuis le début des années 2000, plusieurs projets se sont mis en œuvre en Europe dans le domaine des smart grids. Différents travaux, à leur sujet, offrent des éclairages utiles sur les modalités d'introduction et les enjeux qu'elles soulèvent, en particulier l'étude de Giordano et al (2011) de la Commission européenne et l'article d'Erlinghen et Markard (2012). Le premier propose « d'analyser les tendances et d'anticiper les développements futurs des smart grids en Europe » et a élaboré, pour ce faire, un questionnaire relatif au coût, au stade de maturité (recherche, démonstration ou déploiement) et au segment des smart grids concerné par le projet, ensuite transmis à l'ensemble des parties prenantes. L'article d'Erlinghen et

Markard (2012) explore, pour sa part, le rôle des nouveaux entrants dans la transformation du secteur et la nature de leurs interactions avec les acteurs en place, répartis en deux catégories, fournisseurs d'infrastructures de distribution et de transmission d'électricité ou fournisseurs de compteurs. Étonnamment, les auteurs ne distinguent ni les opérateurs des réseaux, ni les producteurs d'électricité dans la catégorie des acteurs en place. Les nouveaux entrants comprennent les entreprises des NTIC et sont répertoriés en tant que start up ou « adjacents »¹⁶⁶. Étant donné la rareté du nombre d'études relatives à leur rôle dans la transformation du secteur électrique, les auteurs ont ciblé leurs travaux sur ces acteurs particuliers.

Giordano et al (2011) recensent 219 projets débutés ou finalisés avant novembre 2010. Le budget consacré à l'ensemble de ces projets, de l'ordre de 5 Md€, est révélateur de l'ampleur des ressources mobilisées pour promouvoir ce domaine¹⁶⁷. L'étude ne dénombre pas moins de 103 projets R&D (soit 47% de l'ensemble des projets), pour 9% du budget total. Les segments des smart grids retenus pour classer les projets sont les suivants : compteurs intelligents (premier domaine en nombre total de projets), puis, par ordre décroissant, en nombre de projets : intégration des énergies distribuées (« DER »), gestion de la demande (« DR ») et intégration d'énergies renouvelables de large capacité (« RES »). La part des projets de R&D est la plus importante dans le domaine du RES, suivi du DER, du DR et enfin, des compteurs intelligents, signe du degré de maturité respectif de chacun.

L'étude se conclut sur des recommandations à l'intention des régulateurs nationaux, liés à des constats préoccupants à savoir : d'une part, que la régulation au sein des Etats membres inciterait davantage les opérateurs des réseaux à réduire les coûts qu'à améliorer les réseaux ; d'autre part, qu'une large variété d'acteurs bénéficierait de la valeur créée une fois les réseaux opérationnels, alors même que leur participation à l'investissement initial aurait été modique - en effet seuls les opérateurs des réseaux sont supposés supporter la plus grande partie des investissements. L'étude conclut que des incitations réglementaires doivent être instaurées pour accélérer les investissements et s'assurer d'une répartition équitable entre les coûts et les bénéfices dans la mise en place de la plateforme de service.

L'article d'Erlinghagen et Markard (2012) s'appuie sur l'analyse de 450 projets (en phase de recherche, démonstration et déploiement) dans le champ des smart grids, menés sur la période 2000 à 2011. Les auteurs démontrent, d'une part, que l'influence des acteurs des NTIC s'est accrue au fil du temps, de par leur participation à un nombre croissant de projets, passant de 25% en 2009 à 30% en 2011 et, d'autre part, que les acteurs historiques créent de la variété tant sur le plan technologique¹⁶⁸ qu'au niveau des modèles économiques¹⁶⁹. Ce qui révèle une compétition entre les acteurs en place et les nouvelles entreprises technologiques pour la

¹⁶⁶ Pour rappel, un adjacent est une entreprise installée historiquement dans un secteur donné qui introduit sa technologie dans un nouveau secteur.

¹⁶⁷ D'ici 2020, il est prévu que l'Union européenne investira 56 Md€ pour développer les smart grids dont 37% au titre de la transmission d'électricité.

¹⁶⁸ Pour le développement des communications des compteurs intelligents, les entreprises en place utilisent les fréquences radios alors que les nouveaux entrants s'appuient sur leur réseau de téléphonie mobile.

¹⁶⁹ Les entreprises des NTIC jouent le rôle de « general contractor » auprès des opérateurs de réseaux, ce qui court-circuite la relation client fournisseur historiquement établie.

captation de la valeur au niveau des couches de communication et logicielle. Des conclusions en accord avec celles de Giordano et al (2011) qui mettaient en évidence la potentielle captation de valeur par certaines entreprises, pourtant absentes lors de l'investissement initial.

En réponse à cette menace, l'étude montre, en contradiction avec les thèses de Christensen (1997) et Geels et al. (2008), que les acteurs en place, « ni passifs ni opposés à la transformation du secteur », ont réagi en menant une ambitieuse politique d'acquisition de start up technologiques. A partir de 2008, ils enregistrent dix acquisitions par an (contre cinq par an avant 2008) alors que les NTIC poursuivent leurs acquisitions selon la même tendance avant et après 2008 (de l'ordre de cinq par an). Les auteurs concluent que les adjacents sont des catalyseurs importants pour la transformation du secteur à travers la variété qu'ils créent et leur capacité de résistance au processus de sélection ; ils se mettent progressivement en concurrence avec les acteurs en place et bousculent la configuration du secteur en provoquant, du fait de leur influence croissante, la réaction des acteurs établis.

Les conclusions de ces travaux sont éloquentes quant à la structure et l'évolution de ce domaine. Ils soulignent la place centrale des acteurs historiques de l'électricité (opérateurs d'infrastructure, producteurs d'électricité et industriels) tant dans les phases de R&D que de déploiement des smart grids. Ils mettent en évidence les frottements induits par le processus d'addition technologique : déséquilibres entre la répartition de l'investissement initial et des bénéfices (Giordano et al, 2011), mécanismes de compétition entre les acteurs historiques et les adjacents (Erlinghagen et Markard, 2012) ; et démontrent l'influence des adjacents sur la transformation du secteur électrique et la réaction des acteurs en place face à cette menace.

Ces travaux présentent, néanmoins, certaines limites. Les catégories retenues pour classifier les projets ne prennent pas en compte la variété des enjeux des smart grids ; il n'y a, par exemple, pas d'informations précises sur le développement des projets relatifs aux véhicules électriques, ni sur ceux concernant la gestion bas carbone des bâtiments. Ensuite la question des interactions entre « adjacents » et acteurs en place est examinée sans tenir compte du positionnement des électriciens (producteurs et opérateurs de réseaux), ce qui est regrettable au regard du rôle stratégique qu'ils sont amenés à jouer. Dans la mesure où l'ajout des technologies de communication et d'information a un impact systémique, il aurait été nécessaire d'apprécier également la forme que prennent les relations entre électriciens, qu'elle relève de la compétition ou de la collaboration. De fait, l'étude a été menée exclusivement sous l'angle des projets, sans tenir compte des brevets déposés, ce qui ne permet pas d'identifier si les connaissances générées sont privatisées, et limite les conclusions sur la nature des interactions. Enfin, les auteurs généralisent les résultats obtenus quant à l'influence des « adjacents », alors que l'étude de cas réalisée concerne exclusivement les acteurs historiques des NTIC, sans tenir compte de l'éventuel rôle d'adjacents issus d'autres secteurs.

L'analyse des projets collaboratifs et des projets menés par le secteur électrique de 2007 à 2013 devrait permettre de compléter ces résultats. Pour établir une classification suffisamment fine, nous répartirons les projets smart grids selon les six segments suivants : réseau et intégration des EnR, véhicule électrique, gestion IT de la demande, gestion bas carbone des

bâtiments, compteurs intelligents¹⁷⁰, stockage et expérimentation globale. Sur la base de l’Inventaire vert de l’OMPI, les brevets relatifs aux smart grids seront segmentés ainsi : compteurs intelligents, stockage ou véhicule électrique¹⁷¹.

2.1.3.2 Analyse de l’introduction à l’échelle du secteur électrique européen

Avec une participation à 50 projets pour un budget cumulé de 481M€, les smart grids représentent le premier domaine technologique exploré par les électriciens dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Concernant les brevets, 91 ont été déposés entre 2007 et 2013, soit à la deuxième place juste derrière les énergies renouvelables. Les brevets se répartissent de la manière suivante : 40 brevets concernent les compteurs intelligents, 3 le stockage et 48 le véhicule électrique¹⁷².

Il ressort de l’analyse des brevets et des projets que les smart grids représentent le premier domaine technologique exploré par le secteur électrique européen¹⁷³. Et qu’ils disposent, derrière le CCS, de la démarche d’acquisition des connaissances la plus ouverte de l’ensemble des technologies étudiées¹⁷⁴. Le fait que l’indicateur du degré d’ouverture des smart grids soit plus faible que celui de l’ensemble des autres domaines relevant de l’addition s’explique par le niveau particulièrement élevé du CCS, qui tire cet indicateur à la hausse.

¹⁷⁰ Il nous est apparu judicieux de distinguer la gestion bas carbone des bâtiments des compteurs intelligents afin de mettre en évidence le nombre de projets particulièrement faible menés dans ce dernier domaine.

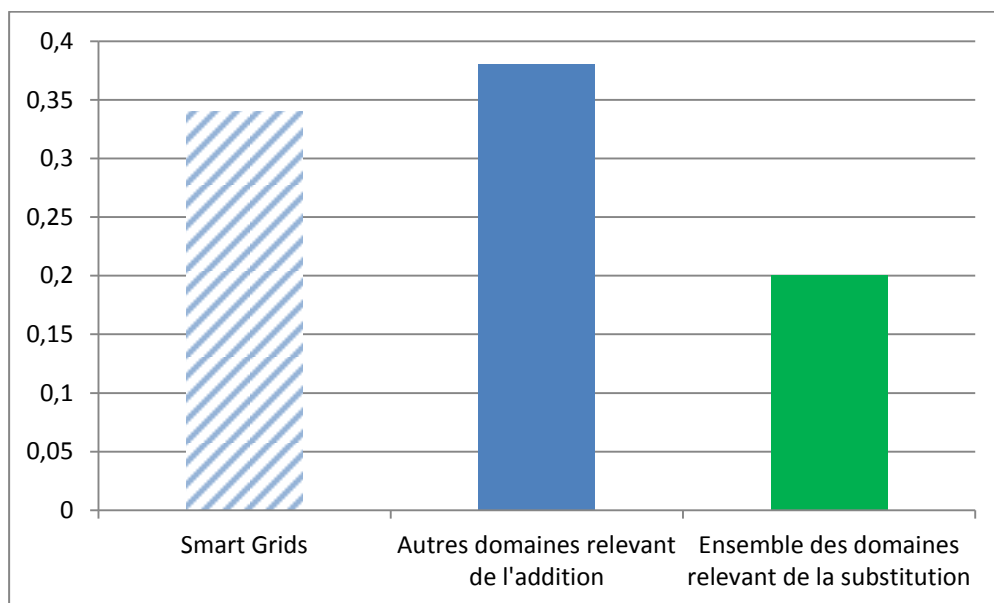
¹⁷¹ Dans la mesure où les inventions relatives à la couche « télécommunications » ne sont pas recensées dans la nomenclature des brevets verts, elles sont exclues de cette étude. De plus, en Europe, les logiciels sont difficilement brevetables, ce qui explique qu’ils ne fassent pas partie, non plus, des classifications retenues dans le cadre des brevets.

¹⁷² Rappelons que seuls ces trois segments ont été retenus pour segmenter les brevets déposés dans le domaine des smart grids.

¹⁷³ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

¹⁷⁴ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

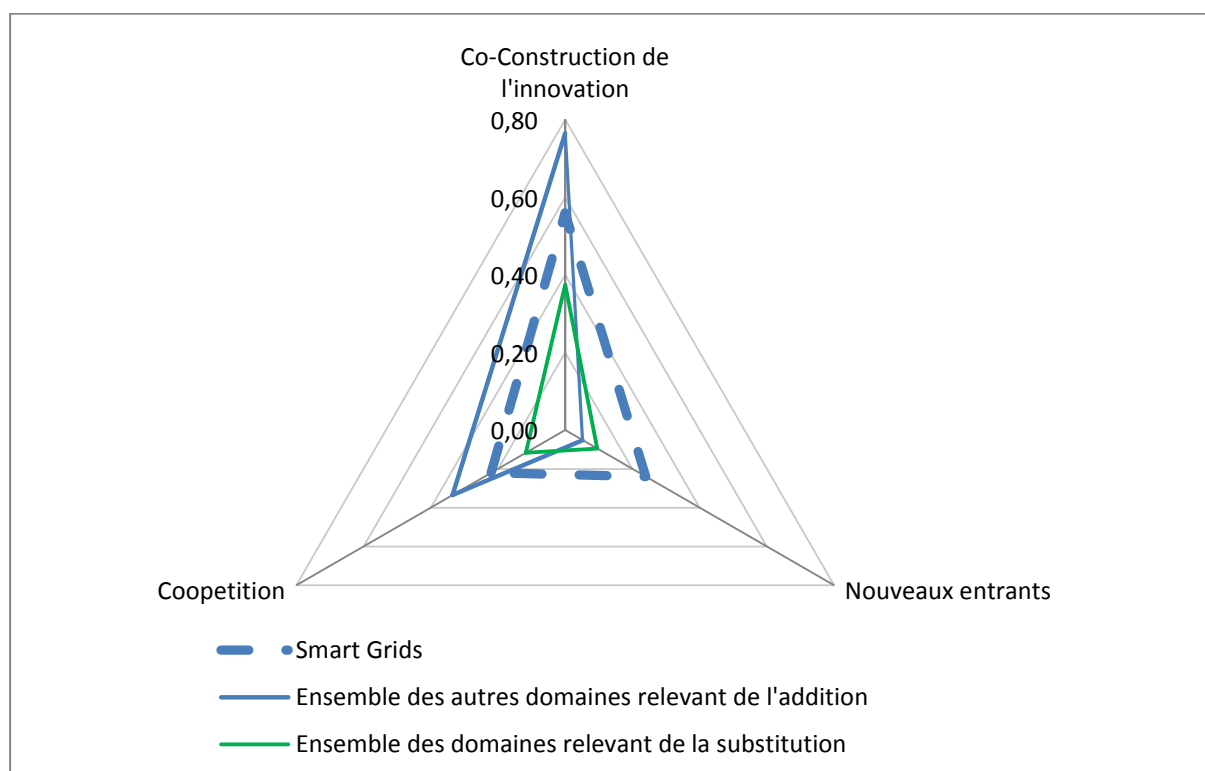
Figure 49 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances dans le domaine des smart grids avec celui observé pour les autres domaines relevant de l'addition technologique et l'ensemble des domaines relevant de la substitution



Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

On constate que le domaine des smart grids se distingue des autres domaines d'addition par son haut niveau de collaboration avec les Nouveaux entrants – également supérieur, sur ce point précis, à l'ensemble des domaines étudiés, et par ses niveaux, inférieurs aux autres domaines d'addition, de « Co-construction de l'innovation » et de « Coopétition » (qui restent toutefois supérieurs à ceux observés pour les domaines de substitution).

Figure 50 : Comparaison du niveau des critères d'ouverture des smart grids avec ceux des autres domaines relevant de l'addition et ceux de l'ensemble des domaines relevant de la substitution.



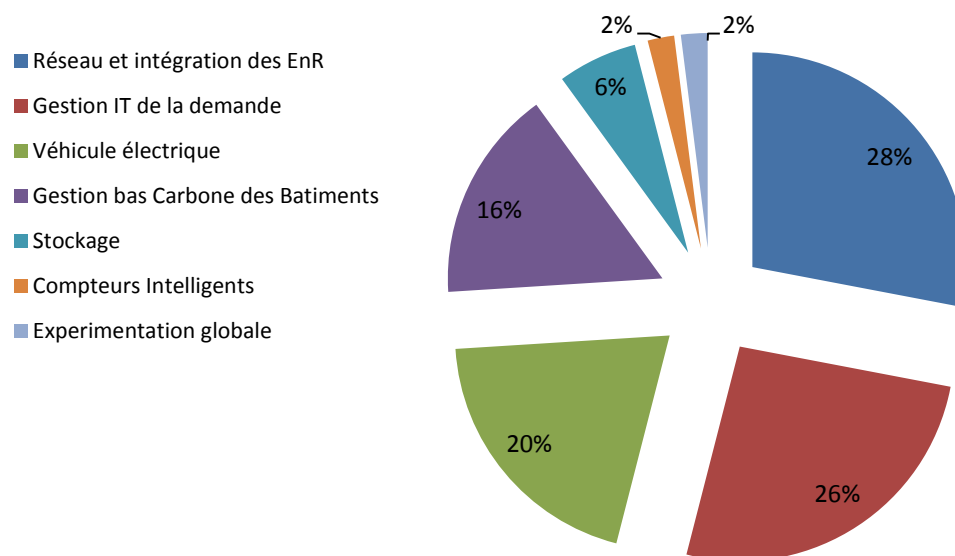
Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

Second constat, le niveau du critère « Co-construction de l'innovation », proche de 0,5 attestant que la démarche d'innovation en collaboration avec les parties prenantes relève d'un niveau identique à celle générée en interne. Ce qui conduit à s'interroger plus spécifiquement sur les motifs qui légitiment la privatisation des connaissances, ou inversement leur libre circulation, ainsi qu'à la nature des acteurs avec lesquels les électriciens interagissent le plus, en prenant, toutefois, soigneusement en compte la diversité des segments des smart grids retenus.

Un examen approfondi des projets (Figure 51) souligne la tendance des électriciens à explorer en priorité le segment des réseaux et intégration des EnR, ce qui avalise les conclusions de l'étude de Giordano et al (2011). Notons, également, qu'un seul projet porte sur les compteurs intelligents, ce qui peut s'expliquer par la maturité de cette technologie. On remarquera, en revanche, que les projets collaboratifs portant sur la gestion bas carbone à l'échelle du bâtiment (par exemple, le projet HOLISTEEC qui propose de concevoir une plateforme de gestion informatique des bâtiments en intégrant notamment les comportements énergétiques externes) suscitent un intérêt certain, qui témoigne de la translation d'échelle, de l'habitation vers l'ensemble du bâtiment. En outre, ces résultats permettent d'apprécier l'intensité de l'engagement mis dans le véhicule électrique, tout nouveau débouché pour l'électricité. En revanche on observe que les électriciens sont très peu actifs dans le domaine du stockage (seulement un seul projet et trois brevets déposés), point qui va nécessiter quelques éclaircissements eu égard à la place qu'il occupera, notamment pour la gestion des énergies

intermittentes. Enfin, remarquons que les électriciens ne participent qu'à une seule expérimentation globale¹⁷⁵, ce qui peut paraître surprenant de prime abord mais se comprend par la nature des financements, qui émanent principalement du niveau local et non de la Commission européenne. En France, par exemple, plusieurs expérimentations globales ont été lancées (et financées par les pouvoirs publics dans le cadre, notamment, des Investissements d'Avenir) telles que Issy Grid (éco quartier dans la zone d'Issy-les-Moulineaux), Nice Grid (dans l'agglomération niçoise) ou Greenlys (réalisée dans la région Rhône-Alpes).

Figure 51 : Répartition des projets en fonction des segments technologiques des smart grids

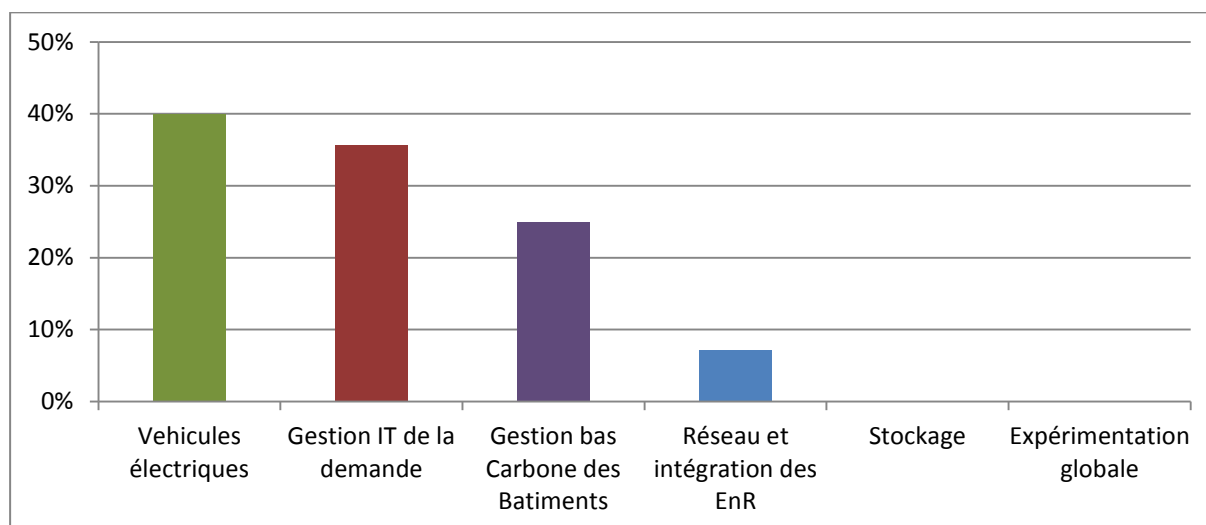


Source : auteur, à partir de Cordis

Une vue d'ensemble des consortiums des projets révèle que les électriciens sont coordinateurs de 20% des projets (contre moins de 10% dans le cas des autres technologies), chiffre qui peut s'interpréter comme une volonté d'orienter les travaux, de se faciliter l'accès à l'ensemble des parties prenantes et, in-fine, de s'approprier plus facilement les résultats obtenus. Notons également que la place des nouveaux entrants diverge sensiblement en fonction des segments: les véhicules électriques (40% des projets), la gestion IT de la demande (38%) et la gestion bas carbone des bâtiments (25% des projets) se détachent assez nettement sur ce point précis.

¹⁷⁵ Une « expérimentation globale » est un projet collaboratif qui associe sur une zone géographique donnée la production d'électricité renouvelable, la gestion bas carbone des bâtiments, la gestion IT de la demande et la gestion de véhicules électriques. Cela permet de bénéficier d'éclairages, à la fois sur le réseau, mais aussi sur le comportement des consommateurs et, en particulier, l'accessibilité des nouvelles technologies à disposition.

Figure 52 : Part des projets orientés « Nouveaux entrants » pour chacun des segments des smart grids



Source : auteur, à partir de la base Cordis

Si l'on se penche plus spécifiquement sur chaque segment, on peut faire les constats suivants. Concernant la gestion bas carbone des bâtiments, il apparaît que les sociétés d'information et de télécommunication (acteurs des NTIC) sont les nouveaux entrants les plus régulièrement associés, suivis des acteurs de la construction puis de ceux issus du secteur de la chaleur et de la ventilation. Concernant les véhicules électriques, ce sont, sans surprise, les acteurs du secteur automobile qui sont les plus présents (au-delà même des acteurs de l'électricité) suivis des acteurs des NTIC. En ce qui concerne la gestion IT de la demande, ce sont les acteurs des NTIC qui sont les nouveaux entrants, là encore, les plus régulièrement associés. Enfin, on remarque qu'il n'y a que quatre start up spécialisées dans la mise en place de logiciels pour le secteur électrique participant à des projets smart grids. Des résultats qui confirment la conclusion de Erlinghagen et Markard (2012) quant à l'intérêt d'analyser, en priorité, la contribution des adjacents dans le domaine des smart grids plutôt que celui des start up. De plus, en mettant en perspective ces résultats avec les travaux du Cleantech Group, il semble manifeste que si les jeunes entreprises sont amenées à jouer un rôle important dans le domaine des smart grids, les adjacents restent les partenaires privilégiés des électriciens. Ce qui peut s'expliquer par la difficulté des électriciens à collaborer avec de jeunes entreprises et par le fait du fait du stock d'innovation, principalement détenu par les grands comptes - et en particulier par les adjacents¹⁷⁶.

Nos résultats confirment ceux de Erlinghagen et Markard (2012) quant à l'influence croissante des adjacents au regard de celle des fournisseurs historiques des opérateurs de réseaux. Cependant, la segmentation fine des projets smart grids permet d'apporter un éclairage plus précis. Le cas du véhicule électrique, à l'intersection du secteur automobile et de l'électricité¹⁷⁷ est, à cet égard, tout à fait symptomatique. Il ressort des 47 brevets déposés,

¹⁷⁶ Cf. [Annexe 6 : Principaux déposants de brevets dans les domaines technologiques étudiés.](#)

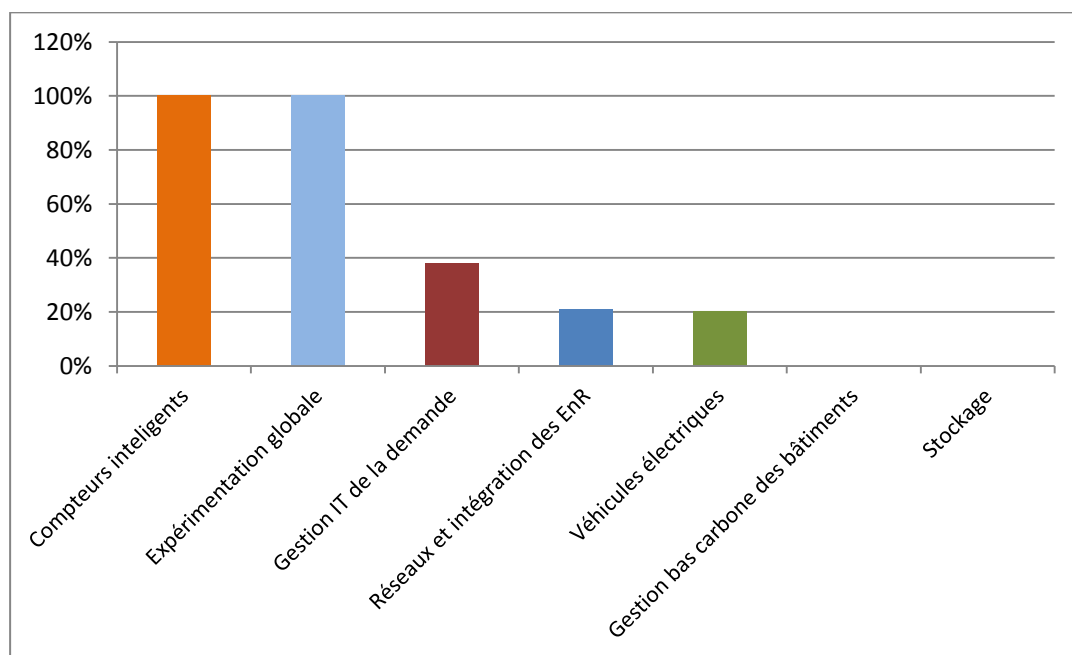
¹⁷⁷ On peut autant considérer que dans le cas du véhicule électrique, les électriciens sont des nouveaux entrants du secteur automobile et que les acteurs de l'automobile sont des nouveaux entrants du secteur électrique. La

que la présence marquée d'acteurs des NTIC, d'équipementiers et de constructeurs d'automobiles stimule l'innovation des électriciens, par une « réaction face à la transformation du secteur » ainsi que cela a été démontré par Erlinghagen et Markard (2012). Alors que les travaux réalisés par les auteurs généralisaient l'influence des acteurs des NTIC sans pour autant prendre en compte le rôle des autres secteurs, nos travaux permettent, grâce au complément d'analyse des différents adjacents, d'avaliser ce résultat.

En revanche, au regard de la forte disparité des métiers entre les acteurs historiques de l'électricité et les adjacents (secteur automobile, construction ...), il serait inapproprié de parler, à ce stade, d'un phénomène de compétition. Dans un contexte où la chaîne de valeur de l'électricité sera profondément modifiée, les modèles économiques et les standards technologiques des smart grids sont, à l'heure actuelle, encore mal définis. Les électriciens sont exposés au risque de ne pas pouvoir tirer des bénéfices à la hauteur des investissements supportés (Giordano et al, 2011), et réagissent afin de s'assurer le maintien d'une position stratégique dans la nouvelle configuration des réseaux et de capter une valeur à la hauteur de leur investissement.

Globalement, on retiendra de la figure 53 que les smart grids font l'objet d'un niveau de coopération élevé entre électriciens. En raison de leur caractère systémique, qui nécessite de collaborer avec toute une variété d'acteurs mais, également, par le fait des monopoles naturels que constituent les opérateurs des réseaux de transmission et de distribution, ce qui exclut, de facto, la compétition « frontale » et encourage, par ricochet, les interactions. Notons cependant, que l'examen du degré de collaboration en fonction des différents segments des smart grids révèle une forte hétérogénéité entre les différentes filières.

Figure 53 : Part des projets associant au moins deux électriciens en fonction des segments des smart grids



Source : auteur, à partir de la base Cordis

Plus précisément, le projet relatif aux compteurs intelligents et celui concernant l'expérimentation globale n'associent, chacun, pas moins de quatre électriciens. Ils portent sur la mise en place d'une expérience à l'échelle européenne mais décentralisée sur plusieurs sites. Si ces projets donnent lieu au partage des résultats et des bonnes pratiques, en revanche, ils ne comportent pas d'interactions sur le plan technologique ; ce qui peut expliquer la collaboration marquée des électriciens qui ne sont pas en situation de se voir capter l'innovation développée – mécanisme dont témoigne, inversement, le cas de l'innovation réalisée dans le domaine des compteurs intelligents et qui fait l'objet de 40 dépôts de brevets. Protéger leurs inventions constitue donc un fort enjeu pour les électriciens, du fait de la nature des innovations produit, c'est-à-dire des innovations auxquelles peuvent accéder les concurrents, et qu'ils peuvent même copier, si la propriété intellectuelle n'est pas protégée.

En excluant du périmètre l'expérimentation globale et le projet relatif aux compteurs intelligents qui mobilisent un nombre important d'électriciens, il apparaît que les segments de la gestion IT de la demande et des réseaux et intégration des EnR sont ceux qui font l'objet de la collaboration entre électriciens la plus marquée. Le caractère systémique des réseaux, la nécessité de les connecter entre eux (comme c'est, par exemple, le cas au sein des projets TWENTIES et IGREENGRID) et la volonté de participer à la définition des standards pour la couche télécommunications (FINSENNY, OpenNode), sont autant de facteurs qui justifient cette collaboration. Notons que la gestion IT de la demande est le seul segment à faire, à la fois, l'objet d'une collaboration marquée entre électriciens et d'une coopération soutenue avec les adjacents (et, principalement, avec des acteurs des NTIC).

Enfin, on constate que les domaines du véhicule électrique et de la gestion bas carbone des bâtiments relèvent d'un niveau de coopération limité entre électriciens, - lié aux conséquents

enjeux commerciaux. On peut en conclure qu'il s'agit là de domaines particulièrement sensibles pour les électriciens, parce qu'à l'intersection des secteurs de l'automobile et de la construction, et victimes de la relation de compétition entre électriciens. C'est ce que tend à confirmer le rapport entre la faible part de collaboration entre électriciens dans le domaine du véhicule électrique, et le nombre important de brevets - avec 47 déposés entre 2007 et 2013, le véhicule électrique se classe au premier rang des segments de smart grids protégés par la propriété intellectuelle -, qui témoigne de la volonté, en ce secteur, de « privatiser » les connaissances et de limiter leur circulation.

2.1.3.3 Conclusion

Le domaine des smart grids est le premier domaine exploré par le secteur électrique, une caractéristique induite de son caractère fortement systémique, et il fait l'objet d'une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte que la plupart des autres domaines. Il nécessite, par nature, une bonne coordination entre les électriciens et avec les nouveaux entrants (il se classe en première place en termes de niveau de collaboration avec ces derniers), et sa démarche d'innovation tend à s'équilibrer entre co-construction et génération interne. Il apparaît, cependant, que sur certains segments, comme ceux de la gestion IT de la demande, de la gestion bas carbone des bâtiments (y compris compteurs intelligents), et des véhicules électriques, les électriciens entrent en compétition les uns avec les autres, au titre de la fourniture de services énergétiques et avec les nouveaux entrants qui menacent leur position stratégique. L'innovation des électriciens (mesurée à travers les dépôts de brevets dont le nombre élevé est significatif) est stimulée par cette compétition et, tout particulièrement, par l'arrivée d'adjacents, un résultat en cohérence avec les conclusions d'Erlinghagen et Markard (2012). Dans un contexte où la chaîne de valeur de l'électricité sera profondément modifiée, les modèles économiques et les standards technologiques des smart grids sont encore mal définis : les électriciens sont exposés au risque de ne pas tirer de bénéfices à hauteur des investissements supportés (Giordano et al, 2011). Les dépôts de brevets peuvent donc s'interpréter comme une réaction visant à maintenir une position stratégique dans la nouvelle configuration des réseaux et à capter une « valeur » à la hauteur des investissements réalisés.

2.1.4 Conclusion

Si la comparaison réalisée dans la section précédente entre innovations relevant de l'addition technologique et celles de la substitution ont mis en évidence le niveau d'engagement et de démarche d'ouverture¹⁷⁸ plus élevé des premières, les études de cas des technologies d'addition ont permis d'affiner ces résultats en montrant une certaine hétérogénéité entre elles.

Tout d'abord, on retiendra la position des smart grids en tant que domaine technologique prioritaire du secteur électrique¹⁷⁹ ; ce qui s'explique par son caractère systémique. Les smart grids comprennent toute une variété de segments complémentaires, qui bouleversent la structure actuelle de la chaîne de valeur de l'électricité. Il apparaît donc fort logique que les électriciens s'inscrivent dans une perspective d'expérimentation et d'innovation pour créer du savoir-faire et des effets d'usage, et, ce, dans le souci constant de conserver un rôle-clé sur ce segment, en dépit de l'arrivée des nouveaux entrants.

Deuxièmement, on constate que, globalement, les domaines d'addition technologique relèvent d'un niveau plus élevé de co-construction de l'innovation que les technologies de substitution ; l'innovation s'appuie dans des proportions supérieures sur des collaborations avec l'écosystème (mesurées par le nombre de projets menés) par rapport à la création en interne (mesurée par le nombre de brevets déposés). Un résultat qui doit être, toutefois, interprété avec précaution, compte tenu du contraste observé en la matière. Si certains domaines s'attachent très peu à protéger leurs inventions (comme c'est le cas du CCS avec 12% de projets et seulement 2% de brevets, révélateur de sa volonté de largement partager les connaissances), d'autres s'inscrivent, au-contre, très nettement dans une politique de protection (c'est le cas dans le domaine des smart grids, dont les brevets déposés représentent 32% du portefeuille, et de la fission nucléaire, 16%). En omettant le CCS, il n'est pas à exclure que les innovations relevant de l'addition technologique soient en fait caractérisées par une politique de dépôts de brevets soutenue : respectivement 91 et 45 déposés dans les smart grids et la fission nucléaire.

Troisièmement, si collaborer semble essentiel, les technologies d'addition présentent des caractéristiques si contrastées qu'il n'est pas possible de les caractériser en fonction de la nature de leurs partenaires. Par exemple, alors que le niveau de collaboration entre électriciens est particulièrement élevé pour les domaines du CCS et des smart grids¹⁸⁰, et témoigne de leur volonté de partager largement les connaissances au sein du secteur électrique dans son ensemble, le niveau de coopération de la fission nucléaire est particulièrement faible, et atteste que sa priorité réside dans la constitution d'avantages compétitifs à travers les résultats obtenus¹⁸¹. De même, alors que pour les smart grids, la part des nouveaux entrants est la plus

¹⁷⁸ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

¹⁷⁹ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

¹⁸⁰ Si le domaine des smart grids fait l'objet d'un niveau de coopération élevé, certains segments tels que la gestion bas carbone des bâtiments ou le stockage font l'objet d'une démarche de coopération nulle.

¹⁸¹ Si les résultats des working packages des projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD sont rendus publics et donc accessibles à tous, le savoir-faire, l'expérience, les connaissances et les compétences acquises à l'occasion

élevée de l'ensemble des technologies analysées, elle est la plus faible dans le cas du CCS ; un contraste qui souligne, dans le premier cas, la nécessité de s'appuyer sur des actifs complémentaires apportés par ces nouveaux entrants (logiciels, dispositifs de télécommunication, construction ...) et, dans le second, de collaborer, en priorité, avec des acteurs en place et expérimentés dans le secteur électrique. Enfin, on retiendra le souci des électriciens de développer des avantages compétitifs autour de certaines technologies d'addition afin de préserver leur position stratégique¹⁸². Alors que dans le cas du CCS, le nombre particulièrement faible de brevets déposés (en valeur absolue et en valeur relative par rapport aux collaborations menées) et l'intensité élevée des coopérations entre électriciens manifestent, qu'au-moins à court terme, les électriciens se situent dans une optique de partage et de diffusion des connaissances, mus par la volonté de trouver ensemble une réponse à un problème commun, l'étude du nucléaire et de certains segments des smart grids met en évidence la priorité contraire, c'est-à-dire créer ou renforcer des avantages compétitifs. Ainsi, le nucléaire, qui est amené à jouer un rôle central dans la transition énergétique, en dépit des controverses dont il fait actuellement l'objet, voit s'engager une compétition à l'échelle internationale, qui concerne, (en raison des exigences en capital requis constituant une barrière à l'entrée significative), exclusivement les électriciens et leurs fournisseurs déjà établis. Ce qui explique la part très faible de nouveaux entrants, et inexistante de jeunes entreprises, ainsi que constaté par les travaux du Cleantech Group (2013).

Tendance similaire du côté des smart grids, en tous cas sur les segments de gestion bas carbone des bâtiments (incluant les compteurs intelligents) et du véhicule électrique, qui s'inscrivent dans une logique de dépôts de brevets et de faible collaboration ; ce qui peut s'expliquer par les enjeux commerciaux mais aussi par leur situation au carrefour de différents secteurs (électrique, construction automobile). Les électriciens sont donc exposés, à la fois, à une compétition entre eux, pour la fourniture de services énergétiques, mais également à la menace de leur position stratégique par les adjacents. Les brevets déposés peuvent donc s'interpréter comme une réaction visant à conserver, voire renforcer, leur position stratégique dans la nouvelle configuration des réseaux et à capturer suffisamment de valeur pour rentabiliser les investissements coûteux réalisés (Giordano et al, 2011). Une tendance qui nous incite à conclure que la compétition entre les électriciens, mais aussi la présence d'adjacents, stimulent la génération d'innovation des électriciens.

de la participation à des projets représentent des atouts considérables vis-à-vis d'un acteur qui aurait uniquement accès aux résultats sans avoir pour autant été engagé dans le projet.

¹⁸² Ce résultat est d'autant plus intéressant que les technologies bas carbone font l'objet pour la plupart d'innovation de procédé, et qu'à ce titre, on aurait pu imaginer qu'une politique de protection des inventions par le secret serait privilégiée.

2.2 LES DOMAINES RELEVANT DE LA SUBSTITUTION ENERGETIQUE

Contrairement aux hypothèses que nous avons formulées, à l'échelle du secteur électrique européen¹⁸³, les technologies de substitution ne font, ni l'objet d'une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte, ni d'un engagement plus marqué que celles relevant de l'addition ; un constat surprenant au regard du rôle qu'elles devraient être amenées à jouer dans la transition énergétique, (en particulier les énergies renouvelables) et de l'expérience relativement faible des électriciens dans ces domaines vis-à-vis des technologies fossiles.

Alors que les applications de l'hydrogène concernent aujourd'hui, principalement, les gaz industriels, elles devraient s'étendre à de nombreux secteurs, notamment celui des transports. Dans le secteur électrique, couplé à des piles à combustibles, l'hydrogène offre la possibilité de stocker de l'électricité, en particulier celle produite à partir de source renouvelable en période de creux, de servir de combustible à des centrales de cogénération ou bien d'être injectée dans les réseaux de gaz. Forme tertiaire d'énergie, il constitue à la fois une alternative aux centrales thermiques et un levier pour l'introduction des énergies renouvelables.

La seconde technologie de substitution étudiée, à savoir les énergies renouvelables, a la capacité de produire de l'électricité à partir de ressources gratuites et inépuisables, mais intermittentes. A ce titre, elles constituent une des clés de la transition du secteur électrique en Europe et plus globalement à l'échelle internationale. Si les électriciens maîtrisent depuis un siècle les technologies hydrauliques, les blocages au sein de l'architecture thermique dont ils sont victimes, les ont conduits à adopter et développer ces technologies avec un certain retard, comparativement aux nouveaux entrants.

Les études de cas réalisées sur la base de l'analyse des projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD et des brevets déposés sur la période 2007 – 2013, visent à comprendre les défis que représentent l'introduction de ces nouvelles filières et les forces en présence, auxquelles elles se heurtent. Et contribuer à identifier les raisons pour lesquelles la démarche d'acquisition des connaissances est moins ouverte que pour les technologies d'addition technologique, tout en évaluant dans quelle mesure les technologies de substitution partagent des caractéristiques communes.

¹⁸³ Le secteur électrique est apprécié par la consolidation des données des six plus grands électriciens européens : EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE.

2.2.1 L'hydrogène

L'hydrogène est depuis longtemps utilisé dans les secteurs de la chimie. Combiné à la pile à combustible, il connaît désormais des applications dans le secteur de l'électricité et, en particulier, dans celui des transports ; l'introduction des véhicules hybrides en Europe, aux Etats Unis et au Japon permettrait d'économiser 3 Gt CO₂ d'ici 2050 dans le cas du scénario 2DS¹⁸⁴ (AIE, 2015e). Bien que la portée de l'hydrogène devrait être toute relative dans la transition énergétique du secteur électrique, nous avons, toutefois, souhaité l'inclure dans notre périmètre d'analyse. Grâce à ses propriétés en termes de stockage et sa capacité à produire de l'électricité « propre », l'hydrogène peut se définir comme une énergie tertiaire susceptible de jouer un rôle clé dans l'introduction des énergies renouvelables, et contribuer, dès lors que sa maturité le permettra¹⁸⁵, à remplacer, dans une certaine mesure, les énergies fossiles utilisées dans les centrales thermiques. Pour cela, de nombreux obstacles restent encore à surmonter : la stabilisation des technologies de production et de stockage et la compétitivité des piles à combustible par rapport aux technologies actuellement utilisées.

Le succès de son introduction est étroitement lié aux progrès de sa production, de son stockage et au développement de piles à combustible, objets de la recherche conduite par les partenaires de la plateforme Fuel Cell and Hydrogene Joint Undertaking. Parallèlement, se pose la question de son niveau de priorité pour la Commission européenne, qui ressort des projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Lesquels projets, couplés aux brevets déposés entre 2007 et 2013 devraient permettre de mieux comprendre comment s'articulent l'introduction de l'hydrogène du point de vue du secteur électrique, et les spécificités des modalités d'acquisition des connaissances en ce domaine particulier.

2.2.1.1 Eléments de contexte

L'hydrogène est l'élément qui possède la quantité la plus élevée d'énergie par unité de poids bien qu'il soit paradoxalement le plus léger et le plus petit de la nature. S'il est également le plus répandu sur le globe, il se trouve presque toujours combiné à d'autres atomes, principalement l'oxygène et le carbone ; d'où la nécessité de l'isoler. Contrairement aux énergies fossiles, présentes à l'état naturel dans le sous-sol, l'hydrogène n'est donc pas considéré comme une source d'énergie, mais comme un vecteur d'énergie synthétique qui permet de stocker ou de transporter l'énergie issue d'autres processus.

En 2013, la production et la consommation d'hydrogène s'élevaient à moins d'un million de tonnes en France, contre près de cinquante millions dans le monde. Une production pour

¹⁸⁴ Le scénario 2DS de l'AIE est le scénario qui prévoit, à horizon 2050, de limiter l'augmentation des températures à 2°C.

¹⁸⁵ Nous mettons en évidence dans le Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#), que la maturité de l'hydrogène était particulièrement faible en comparaison des autres domaines bas carbone étudiés.

l'essentiel destinée à l'industrie chimique pour la synthèse de l'ammoniac et celle du méthanol. Mais, il propose également différentes applications dans le domaine de l'énergie et représente, à ce titre, une technologie prometteuse. En premier lieu, parce qu'il est en mesure de faciliter l'introduction des énergies renouvelables en permettant de gérer l'électricité produite en surplus¹⁸⁶. Grâce à sa capacité à la stocker de manière plus flexible que les technologies actuellement disponibles, elle pourra, une fois convertie en gaz, être réinjectée dans le réseau (« Power to gas »). Deuxièmement, il offre toute une panoplie d'applications, en tant que combustible pour véhicules ou pour produire de l'électricité et de la chaleur à travers le processus de cogénération, ou grâce à la pile à combustible.

Toutes les sources d'énergies fossiles, nucléaires ou renouvelables, permettent de produire de l'hydrogène, en émettant du CO₂ et avec des rendements plus ou moins élevés. Dans la mesure où il est généré après transformation de l'électricité, l'hydrogène peut être considéré comme une « énergie tertiaire ». Mais, malgré la diversité des énergies susceptibles de produire de l'hydrogène, la quasi-totalité (plus de 95 %) de celui-ci est d'origine fossile, réalité qui découle de l'usage majoritaire de la technique de vaporeformage par rapport au processus d'électrolyse. Soulignons, par ailleurs, que les caractéristiques physiques et chimiques de l'hydrogène rendent son stockage plus ardu que celui des carburants liquides ou gazeux utilisés dans la vie courante¹⁸⁷.

Sous réserve d'utiliser de l'électricité d'origine renouvelable ou nucléaire, l'électrolyse de l'eau présente l'avantage de ne concevoir aucune émission de gaz à effet de serre. Si le coût de l'hydrogène peut varier radicalement en fonction de la technologie choisie et du degré d'industrialisation, il est, dans tous les cas, fortement indexé au coût de l'électricité. Le domaine de l'électrolyse reste un champ d'investigation scientifique et de développement industriel assez largement ouvert, malgré la présence d'acteurs historiques solidement implantés.

Si les principaux débouchés concernent aujourd'hui l'industrie chimique et les raffineries, des applications énergétiques commencent à émerger. Découvert par le chimiste français Paul Sabatier, le « *Power-to-Gas* », ainsi dénommé par référence au principe de conversion par électrolyse de l'énergie électrique en hydrogène, permet de convertir l'hydrogène et le gaz carbonique en méthane à des fins d'utilisation directe, d'injection dans le réseau de gaz naturel ou de transformation en méthane. Il implique une production largement décentralisée, au plus près d'installations générant du CO₂ sous une forme suffisamment concentrée. La première installation industrielle de ce type a été inaugurée par le constructeur automobile Audi à l'automne 2013 en Allemagne, à proximité d'une unité de production de biogaz émettrice de CO₂.

¹⁸⁶ Dans la mesure où les énergies renouvelables (en particulier éolien et solaire) sont intermittentes, la quantité d'électricité produite à partir de ces sources ne correspond pas à chaque instant avec le niveau de la demande. Ainsi, afin d'éviter un déséquilibre du réseau, il est nécessaire de pouvoir envisager des solutions permettant soit de stocker l'électricité, soit de la transformer.

¹⁸⁷ Cf. [Annexe 7 : Méthodes de production et de stockage de l'hydrogène](#).

Le couple « hydrogène - pile à combustible » relève de la substitution énergétique dans la mesure où il offre des solutions alternatives pour le stockage de l'électricité, la cogénération d'électricité, la mobilité, et facilite, en outre, l'introduction des énergies renouvelables.

La pile à combustible permet de transformer de l'hydrogène en électricité. Sa découverte remonte à 1839 par le chimiste allemand, Christian Friedrich Schönbein. Le principe consiste à créer de l'électricité en oxydant sur une première électrode l'hydrogène couplé à la réduction d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air sur l'autre électrode. La membrane qui les sépare est en général recouverte d'un métal précieux, qui fait office de catalyseur : le platine¹⁸⁸. Les recherches réalisées depuis les années 60 ont progressivement permis d'allonger la durée de vie des piles tout en diminuant drastiquement leur coût. Couplée à l'hydrogène, la pile à combustible peut être utilisée dans la mobilité bas carbone et dans la cogénération.

L'utilisation de l'hydrogène dans les transports n'est pas une idée nouvelle. Les frères Montgolfier avaient envisagé de l'employer pour leur ballon dès 1782, avant de lui préférer l'air chaud. Toutefois, le pétrole, plus concentré en énergie et plus facile à stocker, l'a vite supplanté. Avec la maturation des technologies liées à l'hydrogène, notamment les piles à combustible PEMFC et le stockage à haute pression, son utilisation dans les transports redevient d'actualité. Les progrès réalisés ont, en effet, permis d'atteindre, pour une production en grande série, un prix de 50 \$/KW, avec une durée de vie qui avoisine désormais les 25 000 heures, soit une distance de l'ordre de 150 000 kilomètres. Le département de l'énergie des États-Unis, estime, qu'à court terme, son coût devrait encore chuter jusqu'à 30 \$/KW et sa durée de vie augmenter jusqu'à 50 000 heures (Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 2013).

Une autre application des piles à combustible, essentiellement de type SOFC, est celle de la cogénération d'électricité et de chaleur. Les piles SOFC permettent de dissocier l'hydrogène à partir du méthane avec un rendement de 90 à 95 %, suivant les conditions de leur utilisation ; et la durée de fonctionnement de ces piles est désormais estimée à plus de dix ans, signe de la maturité atteinte par cette technique. Si leur coût reste encore élevé, il diminue, cependant, rapidement grâce à l'accroissement des cadences de production¹⁸⁹.

Au regard du rôle que l'hydrogène est amené à jouer dans le futur paysage bas carbone, la Commission européenne a créé, en 2008, en partenariat avec les acteurs industriels et scientifiques de la filière hydrogène, la plateforme Fuel Cell Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU). Ce partenariat « public-privé » vise à soutenir des projets relatifs à l'hydrogène et à la pile à combustible avec, pour double objectif, que, d'ici 2020, ils représentent un des piliers du système énergétique et de transport et qu'à horizon 2050 ils contribuent significativement à la transition vers une économie bas carbone, en concurrençant efficacement les technologies

¹⁸⁸ Le platine est un matériau rare qui est, à ce jour, surtout exploité pour la bijouterie. Le développement des piles à combustible pourrait également un jour y avoir recours de manière significative, ce qui pourrait créer des tensions sur ce marché.

¹⁸⁹ Cf. le mécanisme d'économie d'échelle présenté dans le Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

actuellement disponibles afin de s'y substituer¹⁹⁰. La feuille de route fixe, pour y parvenir, les cinq objectifs suivants :

- « réduire le coût de production des systèmes de pile à combustible utilisés dans les applications mobiles tout en augmentant leur durée de vie afin de concurrencer les technologies conventionnelles »,
- « accroître l'efficacité et la durée de vie des piles à combustible utilisées pour la production d'énergie, tout en réduisant les coûts afin de concurrencer les technologies conventionnelles »,
- « accroître l'efficacité énergétique de la production d'hydrogène, en particulier la technique d'électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables tout en réduisant les coûts, de sorte que le système de production d'hydrogène combiné à la conversion à partir de piles à combustible puisse concurrencer les solutions disponibles sur le marché »,
- « démontrer à grande échelle la capacité de l'hydrogène à soutenir l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques, y compris pour son stockage, qui doit représenter un dispositif compétitif »,
- « réduire l'utilisation de ce que l'UE définit comme «matières premières critiques», ou réduire, voire éviter l'utilisation des terres rares ».

On dénombre 88 partenaires industriels qui se répartissent sur les segments¹⁹¹ suivants : « infrastructures de mobilité » (43 membres), « cogénération d'électricité et de chaleur » (46 membres), « production et stockage de l'hydrogène » (24 membres) et « marché précoce » qui comprend des projets de démonstration sur l'ensemble de ces domaines (23 membres). Parmi les partenaires, 53 sont des PME et 33 de grands comptes. Une répartition plutôt étonnante si on la compare aux conclusions du Cleantech Group (2013) qui préjugait d'un rôle subalterne des PME dans le développement de l'hydrogène¹⁹². Les principaux secteurs d'origine des grands comptes impliqués sont ceux de l'automobile et des gaz industriels (respectivement 12 et 3 membres). Et on dénombre seulement quatre « pure players » de l'hydrogène : du fait de sa jeunesse, les brevets sont majoritairement détenus par des acteurs dont l'hydrogène n'est pas le cœur de métier. Enfin, signalons que seulement deux producteurs d'électricité sont associés, ce qui souligne une certaine « distance » du secteur vis-à-vis de ce domaine.

Un premier bilan de l'activité conduite sur la période 2008-2013 a été dressé en 2014¹⁹³ : 130 projets ont été financés sur la période, soit un budget total de 391 M€, avec une représentation des PME à hauteur de 25,6% (ce qui représente un taux de participation supérieur à la moyenne des projets du 7^{ème} PCRD, de l'ordre de 18%) qui ont reçu 100 M€.

¹⁹⁰ Cf. le site internet de la plateforme <http://www.fch.europa.eu/page/what-we-do>.

¹⁹¹ Un même membre peut être présent sur différents segments.

¹⁹² Cf. Chapitre IV, section [1.1 Comparaison des domaines technologiques](#).

¹⁹³ http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/131218_brochure%20FCH%20JU%20%28ID%20196297%29_0.pdf

C'est le segment de la cogénération qui bénéficie du plus grand nombre de projets (53), suivi de la production d'hydrogène (incl. stockage, 26) et de la mobilité (25). Plusieurs constats plus étonnants ressortent du bilan. En dépit de l'intérêt que présente cette technologie pour la production d'électricité, on relève la présence de deux électriciens seulement, et inversement, l'importance du nombre de constructeurs automobiles associés à la plateforme, alors même que la mobilité représente une part plutôt faible des projets. Autre constat, c'est dans le domaine de la production d'hydrogène que les PME sont les plus représentées (38% du budget a été alloué à une PME). Enfin l'étude fait état des progrès du secteur : plusieurs démonstrateurs de véhicules à hydrogène, de plus de 1000 micro-CHP¹⁹⁴, principalement pour les applications domestiques ou l'efficacité énergétique des piles à combustible SOFC de l'ordre de 60%, dont le coût est inférieur à 20 €/KW.

2.2.1.2 Analyse de l'introduction à l'échelle du secteur électrique européen

Ces éléments sont utiles pour distinguer les priorités technologiques du développement de l'hydrogène et de la pile à combustible, et la typologie des acteurs selon leur taille et leur secteur. Mais s'ils dénotent, en outre, de l'intérêt plutôt mineur que lui porte le secteur électrique, des analyses complémentaires sont cependant nécessaires pour préciser son niveau d'engagement et apprécier les modalités d'acquisition des connaissances dans ce domaine. C'est l'objectif poursuivi par l'analyse des brevets déposés entre 2007 et 2013 et les projets menés dans le contexte du 7^{ème} PCRD.

L'analyse de la stratégie technologique du secteur électrique classe l'hydrogène, comme la technologie la moins explorée par les électriciens¹⁹⁵, juste devant le CCS, et cela que l'on se situe sur le périmètre des technologies de substitution ou sur l'ensemble des domaines : lors du 7^{ème} PCRD, les électriciens étudiés sont engagés dans 11 projets relatifs à l'hydrogène pour un coût total de 97 M€. La contribution de la Commission européenne s'élève 47,5 M€, soit un taux de financement en-deçà des 50%, qui fait de l'hydrogène la technologie la moins soutenue de toutes. Si ce modique taux de financement de la CE peut surprendre au regard du faible niveau de maturité de l'hydrogène, il se comprend, toutefois, mis en perspective avec le rôle plus central que d'autres domaines technologiques sont destinés à jouer. En outre, entre 2007 et 2013, seulement 16 brevets ont été déposés, classant l'hydrogène à l'avant-dernier rang des brevets déposés sur la période. Sans anticiper outre mesure sur les travaux présentés dans le chapitre suivant¹⁹⁶, signalons brièvement que cette technologie semble faire l'objet d'une « impasse technologique » pour la moitié des électriciens. Un premier constat qui conforte les observations précédentes relatives au manque d'engagement des électriciens au sein de la plateforme FCH JU.

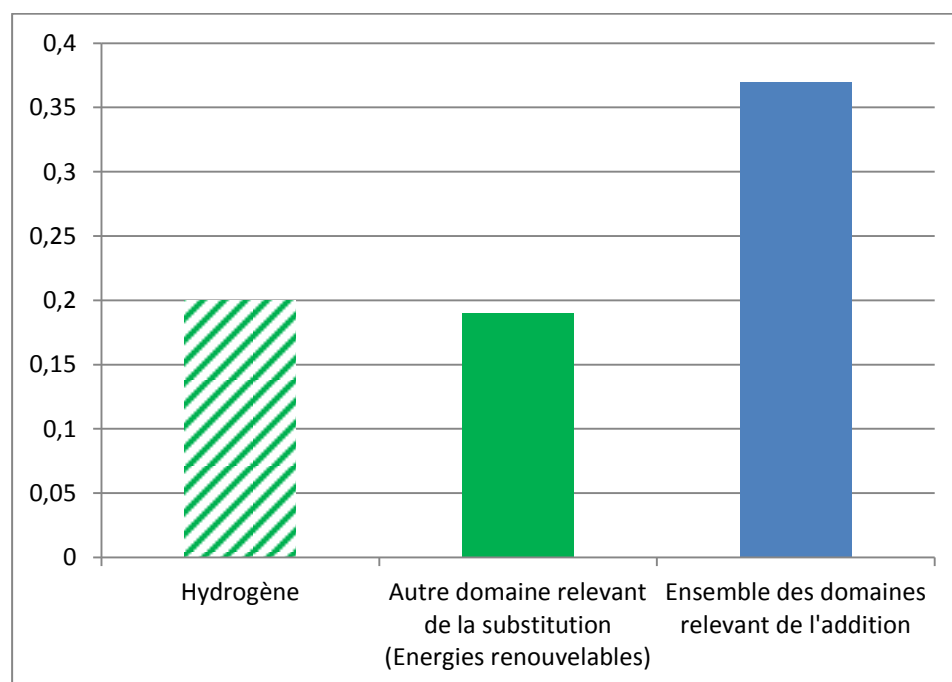
¹⁹⁴ Le CHP désigne le Combined Heat & Power Generators, c'est-à-dire les générateurs permettant à la fois de produire de l'électricité et de la chaleur.

¹⁹⁵ Cf Figure 41 : [Intensité de l'engagement du secteur dans les domaines technologiques](#).

¹⁹⁶ Le chapitre [V – Analyse des stratégies d'innovation des électricien](#) est consacré à des études de cas portant sur chacun des électriciens.

L'analyse des projets réalisés dans le cadre du 7^{ème} PCRD combinée à celle des brevets déposés entre 2007 et 2013 met en évidence l'indice d'ouverture particulièrement faible de l'hydrogène au regard de l'ensemble des technologies étudiées¹⁹⁷ ; ce que conforte la piètre mobilisation des leviers mis en œuvre par les électriciens pour acquérir de nouvelles connaissances. Ce constat mérite, toutefois, d'être nuancé : si ce niveau est nettement inférieur à celui observé pour les technologies relevant de l'addition, il reste du même ordre de grandeur que celui des énergies renouvelables.

Figure 54 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances dans le domaine de l'hydrogène avec celui observé pour l'autre domaine relevant de la substitution technologique et l'ensemble des domaines relevant de l'addition.

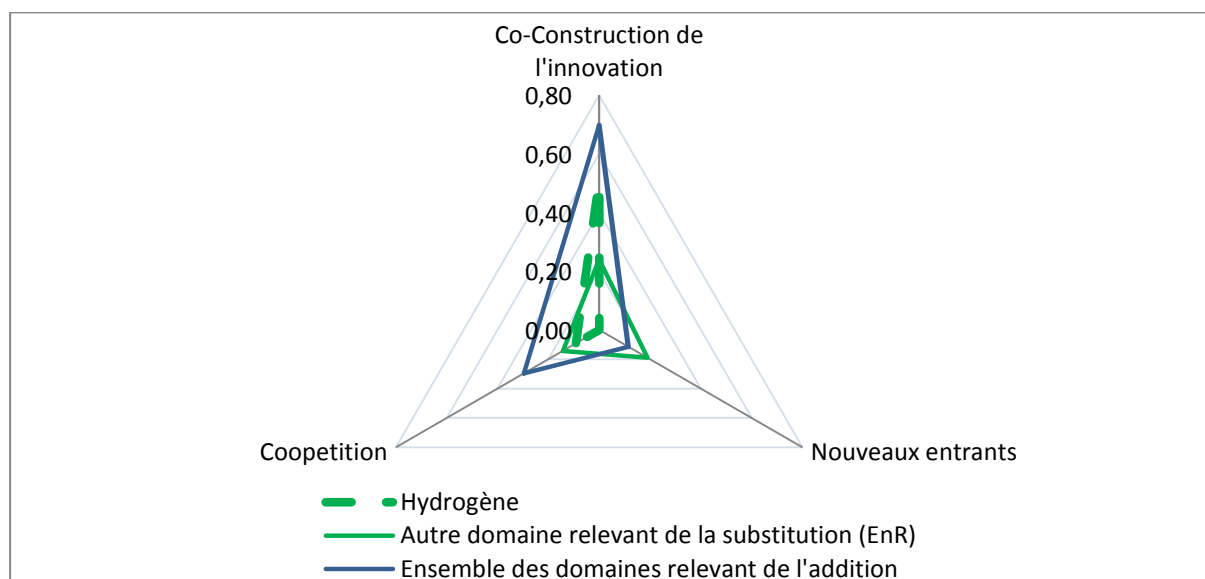


Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

Cependant, même si ces deux domaines, relevant de la substitution, font montre d'une démarche d'ouverture similaire en termes d'acquisition des connaissances, ils obéissent à un comportement sensiblement différent sur la plupart des autres critères d'ouverture. Le niveau de coopération est, certes, plutôt faible, et relativement proche dans les deux cas, mais relativement à la co-construction de l'innovation et à la collaboration avec les nouveaux entrants, leur tendance respective contraste fortement.

¹⁹⁷ Cf Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

Figure 55 : Comparaison du niveau des critères d'ouverture de l'hydrogène avec ceux de l'autre domaine relevant de la substitution et ceux relevant de l'addition.



Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

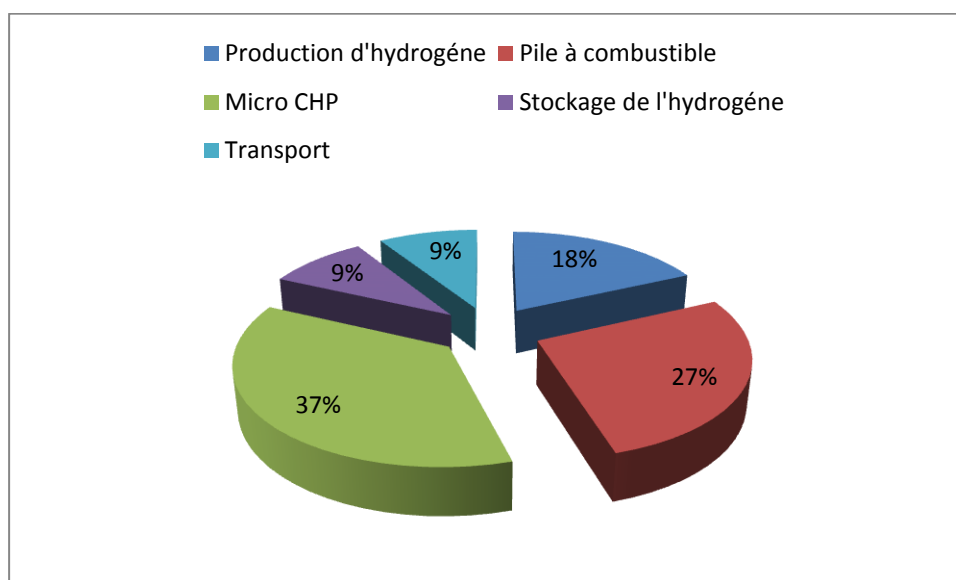
L'indicateur du niveau de coopétition de l'hydrogène, particulièrement bas, est manifeste de la volonté de limiter le niveau de partage des connaissances générées par les projets. Le niveau du critère co-construction de l'innovation, de l'ordre de 50%, atteste que la démarche d'innovation en partenariat avec les parties prenantes est menée dans les mêmes proportions que la génération interne de l'invention. Si ce niveau est supérieur à celui observé pour les énergies renouvelables, il n'en demeure pas moins extrêmement faible au regard de l'ensemble des domaines étudiés et apparaît là aussi révélateur de la politique de privatisation des connaissances en ces matières. Enfin, si nous concluions précédemment que le critère de collaboration avec les nouveaux entrants ne constituait pas un signe distinctif entre technologies de l'addition et celles de substitution, il apparaît, ici, qu'il contraste, en outre, fortement au sein même des technologies de substitution : très faible dans le cas de l'hydrogène, et très nettement supérieur pour les énergies renouvelables. Un constat en ligne avec les conclusions du Cleantech (2013) Group, qui faisaient état d'un faible nombre d'opérations en capital de cette filière ; mais, en contradiction avec l'observation de la plateforme FCG JU, dont les PME représentent près des deux tiers des membres. Par extension, et compte tenu du fait que les dépôts de brevets dans le domaine de l'hydrogène sont principalement réalisés par les acteurs du secteur automobile¹⁹⁸, la faible participation des nouveaux entrants suggère que les projets des électriciens ne portent pas sur la question des transports.

Enfin, l'analyse de la répartition des projets montre clairement les priorités d'implication des électriciens ; en premier lieu, le segment « aval », soit la conversion d'hydrogène en électricité à travers les piles à combustible (en particulier la co génération - CHP), suivi de la production d'hydrogène, et enfin le segment de la mobilité et du stockage de l'hydrogène (chacun un projet). Un résultat logique, étant donné le faible intérêt de la question des

¹⁹⁸ Cf. [Annexe 6 : Principaux déposants de brevets dans les domaines technologiques étudiés.](#)

transports pour les électriciens, qui n'est, certes, pas leur cœur de métier¹⁹⁹, à contrario, résultat plus déconcertant pour ce qui est de leur modeste participation dans le stockage, pourtant susceptible de constituer une solution pour l'électricité produite de façon intermittente par les énergies renouvelables. Notons, toutefois, que ce faible niveau d'engagement fait écho à celui constaté pour les smart grids²⁰⁰ sur ce même segment de stockage.

Figure 56 : Répartition des projets en fonction des segments de l'hydrogène



Source : auteur, à partir de la base Cordis

2.1.3.3 Conclusion

Le couple « hydrogène-pile à combustible » semble, au regard des résultats obtenus, voué à jouer un rôle important dans le secteur automobile mais nettement plus mineur dans la transition du secteur électrique ; tendance que confirment le faible engagement du secteur électrique, et le modeste degré d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances. Par ailleurs, nous retiendrons le faible niveau de coopération et de co-construction de l'innovation, par rapport aux autres technologies étudiées²⁰¹, significatifs d'une certaine forme de détermination, de la part des électriciens, de privatiser les connaissances générées.

¹⁹⁹ Notons que le nombre de projets limités dans le domaine des transports permet aussi d'expliquer le faible niveau des collaborations avec les nouveaux entrants. Alors que les acteurs de l'automobile sont les principaux nouveaux entrants concernés par l'hydrogène, le fait qu'un seul projet soit consacré à ce segment limite de fait les interactions avec les nouveaux entrants.

²⁰⁰ Cf. Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grids](#).

²⁰¹ bien qu'il soit supérieur à celui observé dans le cas des énergies renouvelables qui relève, lui aussi, des technologies de substitution.

2.2.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies gratuites, inépuisables et faiblement émettrices de CO₂. Elles représentent, à ce titre, un des principaux instruments mobilisés en Europe, précurseur en la matière, et à l'échelle internationale, pour lutter contre le changement climatique. En 2014, les capacités renouvelables installées en Europe, hors hydro, représentaient 225 GW soit 22% des capacités totales (ENTSO-E, 2015)²⁰², et 42%, en incluant les capacités hydrauliques. La part d'électricité produite à partir de ressources renouvelables (incluant l'hydraulique) atteignait 32% cette même année (ENTSO-E, 2015). Mais derrière le terme générique « énergies renouvelables » se cache, en réalité, toute une variété de systèmes de production qui ne disposent ni de la même économie, ni du même potentiel de diffusion.

Nous articulerons nos travaux en présentant les enjeux globaux de l'introduction des énergies renouvelables pour le secteur électrique, en particulier pour les trois filières suivantes : éolienne, photovoltaïque et énergies des mers. Des enjeux que déterminent aussi certaines particularités propres au domaine des énergies renouvelables : le fait qu'il a vocation, en Europe, à se substituer aux technologies en place, le rôle central des nouveaux entrants dans sa dynamique, et sa nature intrinsèquement systémique. Enfin, une analyse des brevets et des projets, devrait permettre de caractériser l'introduction des énergies renouvelables dans ce secteur spécifique, le niveau d'ouverture démarche et les modalités d'acquisition des connaissances, la place des nouveaux entrants et les collaborations entre électriciens.

2.2.2.1 Eléments de contexte

En 2007, l'Union européenne s'est fixé pour objectif de porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale à horizon 2020. Pour ce faire, un paquet « Énergie-Climat » a été signé en 2008, dont l'un des principaux textes est celui de la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009. Elle répartit l'effort entre les États membres, fixe des objectifs nationaux en matière d'utilisation des énergies renouvelables pour les transports, la production de chaleur et la production d'électricité, tout en mettant en avant les économies d'énergie et l'efficacité énergétique. A travers cet accord, l'Europe affirmait sa volonté de jouer un rôle de leader au niveau international dans la lutte contre le changement climatique et s'engageait avec ambition vers le développement d'énergies propres.

Six ans après ce premier texte, les 28 pays de l'Union européenne ont abouti le 23 octobre 2014 à un accord sur le « Paquet Énergie-Climat pour 2030 » qui vise à porter la part des énergies renouvelables à 27 % de la consommation finale d'énergie européenne à cet horizon. Certaines parties prenantes des énergies renouvelables comme, par exemple, le Syndicat des

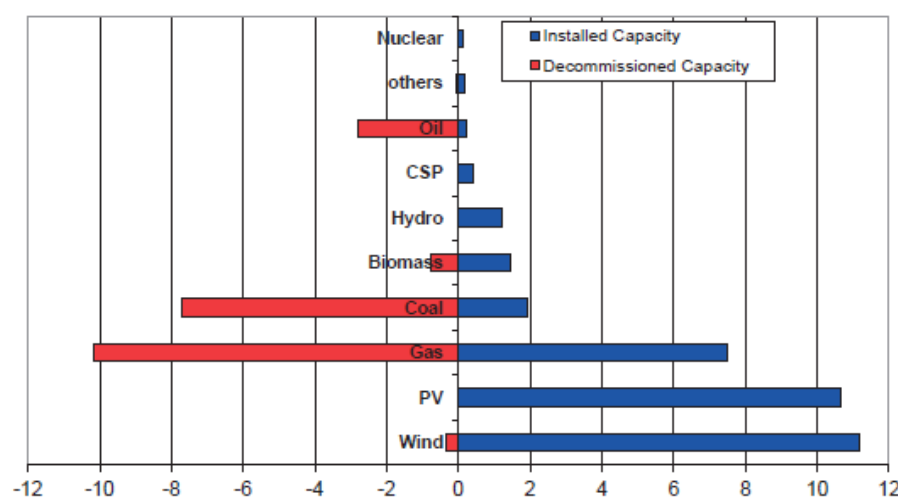
²⁰² L'ENTSO-E est une association qui regroupe 42 opérateurs de transmission d'électricité actifs dans 35 pays européens.

Energies Renouvelables, qui réunit les acteurs français de la filière, rapporte que l'accord de 2014 serait, somme toute, moins ambitieux que celui signé dans le cadre du paquet « Energie Climat 2020 ».²⁰³ Le nouvel objectif se traduit, de fait, par une progression inférieure à celle fixée pour la période 2007-2020, alors même qu'à horizon 2020, les filières des énergies renouvelables devraient avoir accompli une grande partie de leur courbe d'apprentissage, en particulier en Europe. De plus, contrairement au précédent accord, l'objectif n'est contraignant qu'au niveau global de l'Union européenne et non pour chacun de ses pays membres, puisqu'aucun engagement national n'a été pris.

A plus long terme (horizon 2050), l'UE s'est fixée+ comme objectif de réduire les émissions de gaz à effets de serre du secteur électrique de 80 à 95 % par rapport aux niveaux de 1990 (CE, 2013a). Si aucun engagement sur la part des énergies renouvelables n'a été spécifiquement formulé, cinq scénarios de réduction des émissions de CO₂ ont été envisagés (CE, 2011a), avec pour chacun d'entre eux, une augmentation significative de la part des sources d'énergies renouvelables pour atteindre au moins 55 % de la consommation énergétique finale brute. Dans le scénario «part élevée d'EnR », la proportion des EnR dans la consommation d'électricité grimperait même jusqu'à 97 %.

Les énergies renouvelables ont vocation à progressivement se substituer aux unités de production d'électricité thermique. Ce processus est, d'ailleurs, largement entamé aujourd'hui puisque les installations de production d'électricité renouvelable représentent 62 % (soit 17 GW) de la puissance de l'ensemble des nouvelles installations de production installées en Europe en 2013 (Jäger-Waldau, 2014). Dans le même temps, 18 GW de capacités thermiques (gaz et charbon) ont été retirées, alors qu'à peine une dizaine a été raccordée au réseau.

Figure 57 : Comparaison des capacités connectées et mises hors service en Europe en 2013



Source: Jäger-Waldau (2014)

Si, dans leur ensemble, les énergies renouvelables constituent une pièce centrale du dispositif de transition énergétique du secteur électrique, chacune des différentes énergies n'a pas vocation à y jouer un rôle de même importance. Les deux « principales » sources d'électricité

²⁰³ www.enr.fr/energies-renouvelables-en-europe

renouvelable²⁰⁴ sont l'énergie photovoltaïque (86,7 GWc de capacité totale installée en 2014, Observ'ER, 2015) et l'énergie éolienne (130,4 GWc de capacité totale installée en 2014 dont 2,25 GWc d'éolien offshore, Observ'ER, 2015). Dans son baromètre annuel des énergies renouvelables, Observ'ER²⁰⁵ estime que, si la tendance actuelle se poursuivait, une puissance photovoltaïque de 150 GWc pourrait être installée en Europe à horizon 2020, ce qui permettrait d'atteindre, puis de dépasser, l'objectif de 83,7 GWc fixé en 2009. En revanche, si l'installation de capacités éoliennes progressait jusqu'en 2020 selon la même courbe de croissance, alors la capacité totale atteindrait 200 GWc à la date donnée, un chiffre en deçà de l'objectif poursuivi de 211,4 GWc. Par ailleurs, EurObserv'ER estime que l'objectif concernant l'éolien offshore (42,1 GW d'ici 2020) pourra difficilement être respecté dans la mesure où la capacité installée en 2014 était seulement de l'ordre de 2,25 GWc.

Avec les engagements pris depuis 2007 et la place de précurseur qu'elle a conséquemment occupée, l'Europe a longtemps représenté le principal marché des EnR, même si elle est désormais rejointe par d'autres régions du monde. En 2014, l'énergie éolienne européenne assure sur le territoire 7,5 % de la production d'électricité soit 251,6 TWh et représente 32,7 % de la puissance éolienne mondiale, soit environ 12 GW, à un niveau constant depuis 2012 (Observ'ER, 2015). A la même date, la capacité photovoltaïque installée, cumulée dans le monde, avoisine 180 GW, dont 87 GW en Europe, (Observ'ER, 2015). Un taux qui s'approche des 50% de la capacité totale installée, mais dont le rythme de croissance s'est nettement ralenti depuis 2011 : 11GW ont été installées cette même année (l'Europe se hissait alors à 74% des capacités mondiales installées) contre seulement 7 GW en 2014 (soit seulement 18% des nouvelles capacités installées dans le monde cette année-là). Le ralentissement de la croissance est lié à la crise économique et budgétaire qui a amené la plupart des pays européens à restreindre, voire supprimer leur soutien au photovoltaïque, jugé trop coûteux et, ce, malgré la forte baisse du coût des panneaux. En parallèle, les marchés asiatiques ont connu une croissance fulgurante : en 2014, la Chine et le Japon représentent, à eux deux, plus de la moitié du marché mondial. Concernant le secteur électrique, en 2014, le photovoltaïque couvre 2,7 % de la consommation d'électricité des pays européens (ENTSO-E, 2015), qui regroupe les principaux opérateurs de la transmission d'électricité.

Grâce à une politique de tarif de rachat particulièrement agressive, de nombreux pays européens ont joué un rôle déterminant dans la diffusion de ces technologies, en particulier l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne²⁰⁶. Ce qui a consécutivement stimulé l'innovation, conduit à l'émergence de nombreuses jeunes entreprises, lesquelles start up ont, à leur tour, attiré pléthore d'investisseurs : l'éolien et le photovoltaïque sont, aujourd'hui, les technologies phares en nombre d'investissement en capital²⁰⁷. Cependant, depuis 2008, on assiste à une chute des tarifs de rachat dans la plupart des pays européens, du fait de la crise économique

²⁰⁴ Hors hydraulique dont les premiers barrages ont été installés au début du XXème siècle. Les capacités étant saturées en Europe, cette technologie ne connaîtra pas de croissance dans cette région.

²⁰⁵ EurObserv'ER est l'observatoire européen des énergies renouvelables. Il est co-financé par la Commission européenne, l'ADEME et la Caisse des Dépôts.

²⁰⁶ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

²⁰⁷ L'évolution des brevets et des opérations d'investissement en capital a été documenté dans le Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

traversée par l'Europe et de la compétitivité accrue de la production d'électricité d'origine éolienne et photovoltaïque, (qui concurrencent, désormais, celle produite par les énergies fossiles²⁰⁸), et ne nécessite donc plus d'être aussi soutenue qu'auparavant même si des efforts d'innovation restent nécessaires, tant pour le solaire photovoltaïque que pour l'éolien. Pour le premier, l'enjeu consiste à développer des couches de seconde génération (couche mince telle que le silicium amorphe, le tellure de cadmium, les cellules mixtes) et de troisième génération (nouvelles technologies telles que cellules à concentration, cellules organiques, nanomatériaux) pour augmenter le rendement des cellules, notamment lorsque le niveau d'ensoleillement n'est pas optimal. L'éolien doit également surmonter plusieurs défis, notamment sur son secteur offshore pour lequel la construction des infrastructures et le raccordement au réseau relèvent d'un niveau élevé de complexité.

En complément de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne, d'autres énergies renouvelables ont vocation à jouer un rôle de premier plan. C'est, par exemple, le cas des énergies marines pour lesquelles l'Europe occupe, une fois encore, une position de leader. En 2013, la Commission européenne a soutenu trois projets d'énergies marines pour un total de 104,5 M€. Si la production d'électricité à partir de l'énergie des mers n'est pas une technique nouvelle en soi²⁰⁹, elle ne s'est pourtant jamais significativement développée. Avec plus de 10 MW installées en 2014, les capacités de production d'énergie marine de l'Europe représentent plus du double de celles de la Chine, du Canada et de la Corée du Sud réunies. L'association Ocean Energy Europe, qui regroupe les acteurs des énergies des mers, estime qu'à horizon 2050, une puissance de l'ordre de 100 GW pourrait être installée, sous réserve d'une conséquente diminution du coût de la technologie.

La diffusion massive des différentes technologies de production d'électricité à partir de ces ressources implique une transformation du système électrique en profondeur, liée au caractère systémique des énergies renouvelables, bien supérieur à celui des autres technologies bas carbone étudiées. Tout d'abord, parce que la production d'électricité renouvelable mobilise toute une variété de nouveaux entrants, dont l'arrivée bouscule la structure du système. Que ce soit au niveau des fournisseurs d'équipements ou des producteurs d'électricité, ces derniers sont devenus des acteurs incontournables du secteur, reléguant au second plan, au moins temporairement, les acteurs historiques de la filière (électriciens et leurs fournisseurs) bloqués dans l'architecture thermique dominante²¹⁰. L'introduction des énergies renouvelables nécessite en effet un savoir-faire, un maillage territorial et une maîtrise de nouveaux modèles économiques très éloignés des connaissances historiques des électriciens et de leurs partenaires. L'arrivée des nouveaux entrants, amplifiée par le contexte de diffusion rapide des énergies renouvelables destinées à remplacer les technologies fossiles, perturbe le modèle établi du secteur électrique en produisant un « effet systémique » sur celui-ci.

Les énergies renouvelables génèrent, de ce fait, des « coûts systémiques » supérieurs à ceux des technologies thermiques (OCDE, 2012). L'introduction d'une quantité importante

²⁰⁸ Le coût de production de l'électricité à partir de ces procédés est proche de la « parité réseau ».

²⁰⁹ La mise en service de l'usine marémotrice de la Rance, dont la puissance atteint 240 MW, date de 1966.

²¹⁰ Les éléments freinant la diffusion des innovations bas carbone ont été documentés dans le Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

d'énergies renouvelables intermittentes entraîne des surcoûts pour les réseaux de transport et de distribution, un besoin accru d'un équilibrage à court terme et la création d'une capacité de réserve à long terme.

Figure 58 : Comparaison des coûts systémiques au niveau du réseau de différentes sources d'énergie en Allemagne²¹¹

Allemagne												
Technologie	Nucléaire		Charbon		Gaz		Éolien terrestre		Éolien offshore		Solaire	
Niveau de pénétration	10 %	30 %	10 %	30 %	10 %	30 %	10 %	30 %	10 %	30 %	10 %	30 %
Coûts de réserve (adéquation)	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	7,96	8,84	7,96	8,84	19,22	19,71
Coûts de rééquilibrage	0,52	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	6,41	3,30	6,41	3,30	6,41
Connexion au réseau	1,90	1,90	0,93	0,93	0,54	0,54	6,37	6,37	15,71	15,71	9,44	9,44
Renforcement et extension du réseau	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,73	22,23	0,92	11,89	3,69	47,40
Coûts systémiques totaux au niveau du réseau	2,42	2,25	0,97	0,97	0,54	0,54	19,36	43,85	27,90	42,85	35,64	82,95

Source : OCDE (2012)

Les coûts systémiques, induits par la variabilité des énergies renouvelables, peuvent être, grosso-modo, divisés en deux catégories. D'une part, ceux liés à l'extension et au renforcement des réseaux de transport et de distribution ainsi qu'au raccordement de nouvelles capacités. D'autre part, ceux nécessaires pour équilibrer à court terme l'offre et la demande et maintenir à long terme des capacités de réserve suffisantes pour garantir l'approvisionnement malgré l'intermittence des énergies renouvelables.

Outre les coûts systémiques qu'il engendre, le déploiement des énergies renouvelables affecte également le système électrique au travers des effets suivants (OCDE, 2012) :

- la baisse et l'instabilité des prix de l'électricité sur les marchés de gros dues à l'afflux d'énergies renouvelables variables aux faibles coûts marginaux ;
- la réduction des facteurs de charge des technologies programmables (« effet de compression ») du fait de l'accès prioritaire au réseau dont jouit l'électricité produite par les énergies renouvelables, par rapport à celui dont bénéficient les technologies programmables ;
- le creusement d'un écart entre les coûts de production de l'électricité et les prix des marchés de gros, dû à la sous-optimisation de la structure de production actuelle, suite à l'afflux des énergies renouvelables.

Enfin, en raison du blocage créé par l'architecture fossile dominante sur les électriciens établis, les nouveaux entrants sont amenés à jouer un rôle majeur. Pour chacune des filières renouvelables considérées, on constate ainsi que les principaux déposants de brevets sont des acteurs en place, déjà présents dans le domaine de l'énergie (Mitsubishi, General Electric pour

²¹¹ Les coûts systémiques dépendent de la technologie et du pays. Nous présentons ici ceux de l'Allemagne mais les coûts supportés par différents pays européens sont disponibles dans l'étude.

l'éolien et les énergies des mers), ou des adjacents qui diversifient leurs activités (comme les acteurs de l'électronique qui se lancent dans le domaine du photovoltaïque)²¹². Mais talonnées par de jeunes entreprises spécialisées dans la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables (en particulier dans les domaines du photovoltaïque et de l'éolien onshore), dont la croissance a été tractée par le niveau des tarifs de rachat (ce point est particulièrement valable dans le cas du photovoltaïque et de l'éolien, décentralisés par rapport aux énergies marines). Les acteurs de l'électricité sont, désormais, en concurrence avec des nouveaux entrants alors même que ces derniers disposent du savoir-faire pour opérer des unités éoliennes et des parcs photovoltaïques, et du maillage territorial. Soulignons que, face à cette menace, les électriciens ont réagi en faisant l'acquisition d'acteurs leaders dans l'éolien (rachat de la Compagnie du Vent par Engie et de SIIF par EDF), et dans le photovoltaïque (rachat de Solaire Direct par Engie). Enfin, l'introduction des énergies renouvelables fait l'objet d'une compétition au niveau des fournisseurs, en bousculant les relations entre les producteurs d'électricité et leurs fournisseurs historiques. Dans la mesure où ces derniers sont, eux aussi, bloqués dans l'architecture thermique, les électriciens vont être tentés de s'adresser aux nouveaux entrants pour bénéficier d'actifs complémentaires, comme l'atteste la présence importante des jeunes entreprises dans les associations professionnelles européennes²¹³ de chacune des filières renouvelables.

Les énergies renouvelables ont vocation à se substituer aux énergies fossiles en Europe et à connaître une trajectoire de croissance soutenue à l'échelle internationale. Elles représentent donc de nouveaux marchés à conquérir pour les électriciens européens qui se vont se retrouver en situation de compétition, notamment avec les nouveaux entrants qui devraient jouer un rôle de premier plan, tant en amont qu'en aval de la filière (de la fourniture d'infrastructure à la production d'électricité). En outre, la diffusion des énergies renouvelables provoque des effets systémiques sur le système électrique, que ce soit au niveau de l'organisation du secteur (suite à l'arrivée de nouveaux entrants), sur le réseau (elle nécessite de le faire évoluer pour faciliter l'injection des énergies renouvelables, prioritaires sur celui-ci) ou les autres systèmes de production. Cependant, si les principes de fonctionnement sont similaires (gratuité, intermittence et décentralisation de l'énergie), chaque énergie renouvelable comporte ses spécificités et se confronte à des défis propres à chacune, pour réussir son introduction.

2.2.2.2 Analyse de l'introduction à l'échelle du secteur électrique européen

L'analyse des projets collaboratifs menés par le secteur électrique à l'occasion du 7^{ème} PCRD conduit de 2007 à 2013 et des brevets déposés sur la même période, devrait permettre de discerner non seulement les spécificités communes aux énergies renouvelables par rapport aux autres technologies mobilisées pour lutter contre le réchauffement électrique, mais aussi d'identifier précisément les modalités d'acquisition des connaissances pour chacune des

²¹² Cf. [Annexe 6 : Principaux déposants de brevets dans les domaines technologiques étudiés.](#)

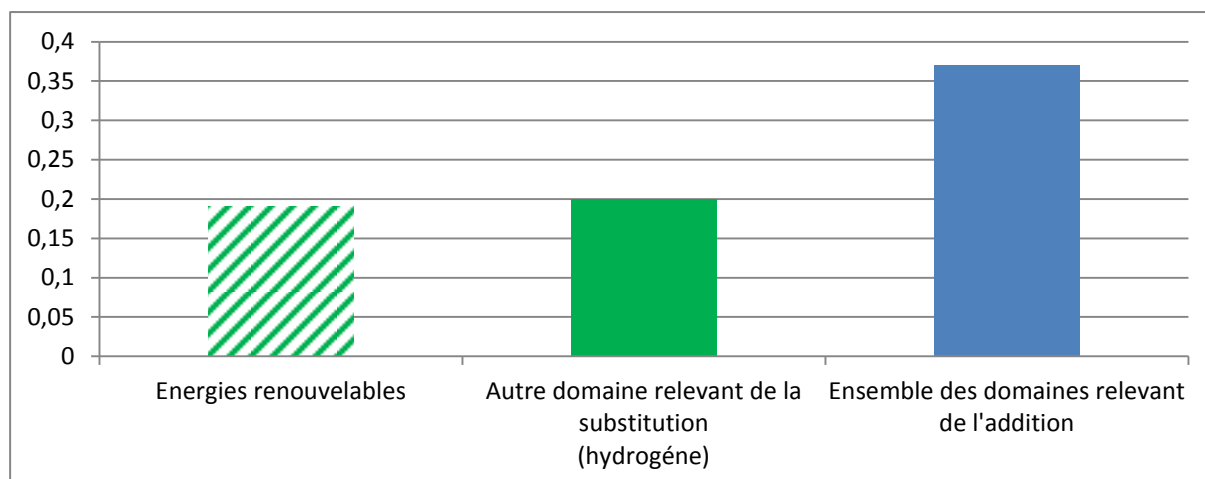
²¹³ Solar Power Europe, ex European Photovoltaic Industry Association pour le photovoltaïque, Ocean Energy Europe, pour les énergies des mers, European Wind European Association pour l'éolien.

filières. En premier lieu, nous présenterons les résultats pour l'ensemble du secteur avant de distinguer chacune des filières individuellement. Afin d'être exhaustif sur le périmètre des énergies renouvelables explorées par ces électriciens, nous inclurons, en addition des filières éoliennes, photovoltaïques et marines précédemment citées, le positionnement des électriciens dans le domaine du solaire à concentration et des biofuels. Si ces technologies ne sont pas expressément dédiées à la production d'électricité, elles font néanmoins l'objet d'une démarche d'innovation de la part des électriciens dans des proportions suffisamment notables pour être étudiées. Elles seront regroupées dans la catégorie « Divers ».

Le constat qui prédomine à l'issue de l'analyse de la stratégie technologique effectuée sur l'ensemble des électriciens est la place des énergies renouvelables, qui se classent derrière les smart grids, soit le second domaine technologique le plus exploré par les électriciens²¹⁴, avec une participation sur 21 projets pour un budget cumulé de 155 M€. En revanche, de façon plus attendue, elles bénéficient du taux de soutien le plus élevé de la Commission européenne (de l'ordre de 105 M€), soit un taux de financement de 67%, qui confirme la priorité de cette technologie pour les pouvoirs publics. Notons, enfin, le grand nombre de dépôts de brevets, 116, qui la classe au premier rang des technologies protégées.

Globalement, il ressort de l'analyse des brevets et des projets, que les énergies renouvelables disposent de la démarche d'acquisition des connaissances la moins ouverte de l'ensemble des technologies²¹⁵. Avec la nuance suivante cependant : si ce niveau est nettement inférieur à celui observé pour les technologies relevant de l'addition, il est, pourtant, du même ordre de grandeur que celui de l'hydrogène, l'autre domaine de substitution énergétique.

Figure 59 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances dans le domaine des énergies renouvelables avec celui observé pour l'autre domaine relevant de la substitution technologique et l'ensemble des domaines relevant de l'addition.



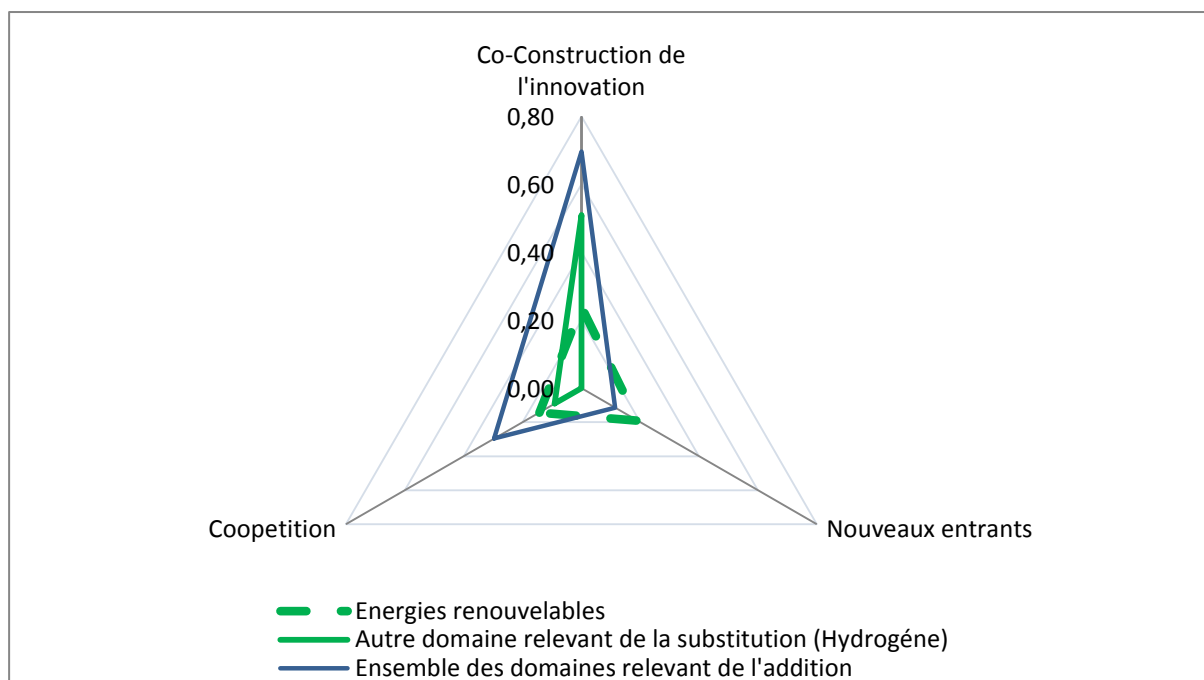
Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

²¹⁴ Cf. Figure 41 : [Intensité de l'engagement du secteur dans les domaines technologiques.](#)

²¹⁵ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

En dépit de cette similitude, les deux domaines de la substitution font l'objet d'un comportement radicalement différent sur la plupart des autres critères d'ouverture. Le niveau de coopération, plutôt faible, est, certes, quasiment identique pour les deux technologies, mais il diffère sensiblement en matière de co-construction de l'innovation et de collaboration avec les nouveaux entrants.

Figure 60 : Comparaison du niveau des critères d'ouverture des énergies renouvelables avec ceux de l'autre domaine relevant de la substitution et ceux de l'ensemble des domaines relevant de l'addition.

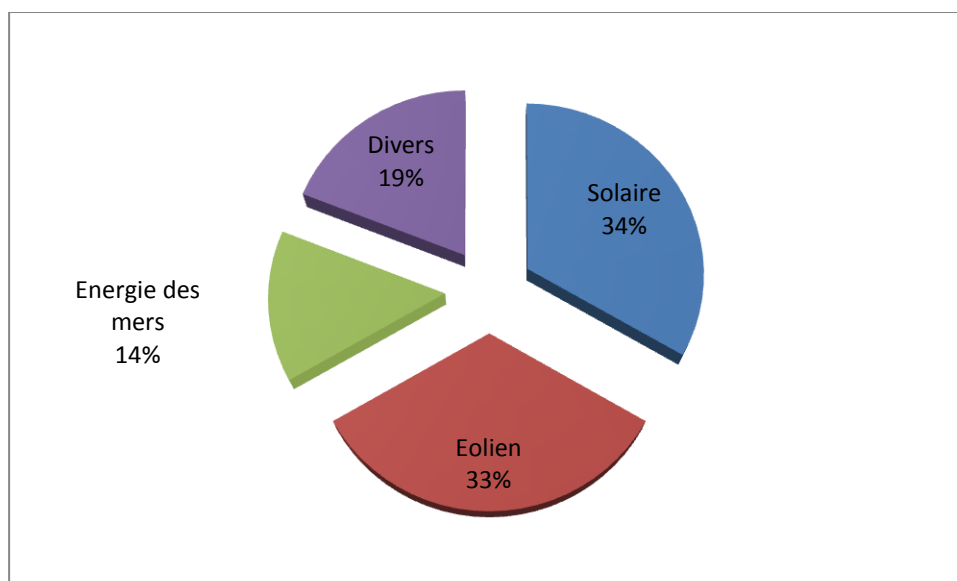


Source : auteur, à partir des bases Patstat et Cordis

Le niveau de coopération particulièrement faible atteste la volonté de privatiser les connaissances générées durant les projets, ce que confirme le niveau de co-construction de l'innovation, le plus faible de l'ensemble des domaines technologiques étudiés. Largement inférieur à 0,5, il tend à démontrer que la démarche d'innovation s'appuie prioritairement sur une génération interne d'inventions, plutôt que sur des collaborations avec les parties prenantes. La compétition dans laquelle sont engagés les électriciens, entre eux et avec les nouveaux entrants pour installer des capacités renouvelables à l'échelle internationale et créer à travers leurs brevets des barrières à l'entrée, justifie ce résultat. En revanche, on note que les énergies renouvelables font l'objet de collaborations assez intenses avec les nouveaux entrants, ce qui confirme la place prépondérante, observée précédemment, occupée par ces derniers sur ce segment. Une première série de constatations qui incitent à se pencher sur les raisons de ces modalités particulières de collaboration, ainsi que sur la nature des acteurs avec lesquels les électriciens interagissent, et cela à l'échelle des différentes filières.

Un examen approfondi des projets met en évidence que les électriciens expérimentent en priorité les énergies éoliennes et solaires, résultat cohérent au regard du rôle promis à ces deux énergies dans le futur paysage bas carbone.

Figure 61 : Répartition des projets en fonction des filières renouvelables



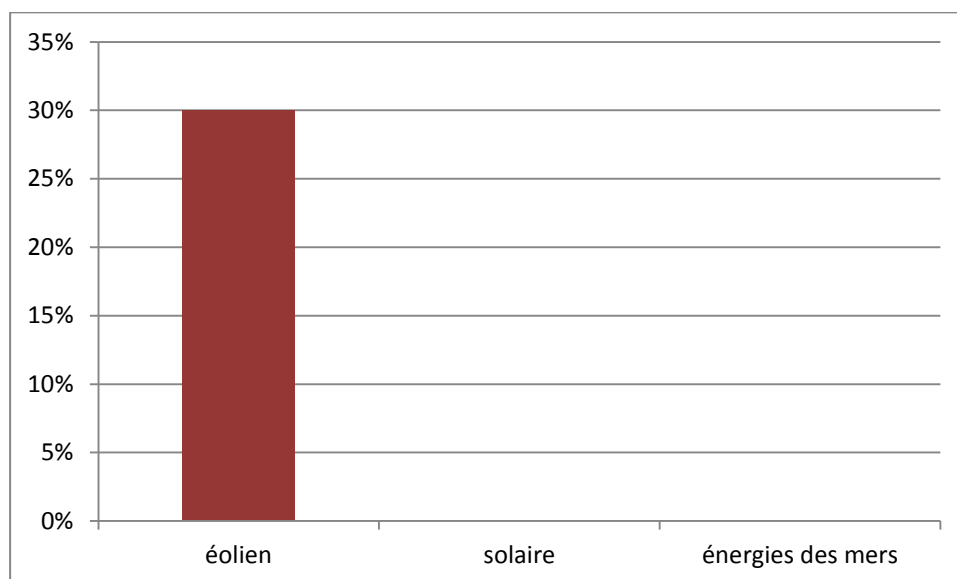
Source : auteur à partir de la base Cordis

Les projets relatifs au solaire concernent principalement le photovoltaïque²¹⁶, et, au sein de celui-ci, en particulier les couches de seconde génération (n-type monocristalline c-Si, projet Hercules), de troisième génération (Cellules à concentration, projet Apollon) et la mise en place de dispositifs pour faciliter l'injection de l'électricité photovoltaïque dans le réseau. Dans la mesure où les électriciens accusaient un certain retard sur le photovoltaïque de première génération, ils souhaitent, désormais, développer suffisamment rapidement leurs connaissances pour se positionner sur les technologies de générations suivantes. Les électriciens sont présents sur le solaire à concentration à travers deux projets hybrides, visant à produire de l'électricité tout en alimentant une centrale de désalinisation. Concernant l'éolien, trois projets sont menés dans l'éolien offshore contre quatre dans l'éolien terrestre. Ces projets concernent principalement l'évaluation des conséquences de l'injection de l'énergie produite à partir d'énergie éolienne sur le réseau (SAFEWIND), et la gestion de la chaîne de valeur pour diminuer le coût d'installation des centrales éoliennes (LEANWIND, MERMAID).

Notons que le niveau de coopération relativement faible, du fait de la compétition acharnée en ce domaine, varie selon les segments. Alors que dans les cas du photovoltaïque, des énergies des mers, et du CSP, on observe qu'aucun projet n'associe, au-moins, deux électriciens, il apparaît que, dans le cas de l'éolien, près d'un tiers des projets donnent lieu à une semblable collaboration (Figure 62), qui se manifestent, néanmoins, exclusivement dans le domaine de l'éolien offshore. Pour une raison compréhensible : l'installation d'unité offshore est, en effet, réalisée par appels d'offres, auxquels vont répondre des consortiums européens constitués à cet effet.

²¹⁶ La part des projets relatifs au photovoltaïque dépasse 70% alors qu'elle atteint moins de 30% pour le solaire à concentration.

Figure 62 : Part des projets associant au moins deux électriciens en fonction de chacune des filières renouvelables

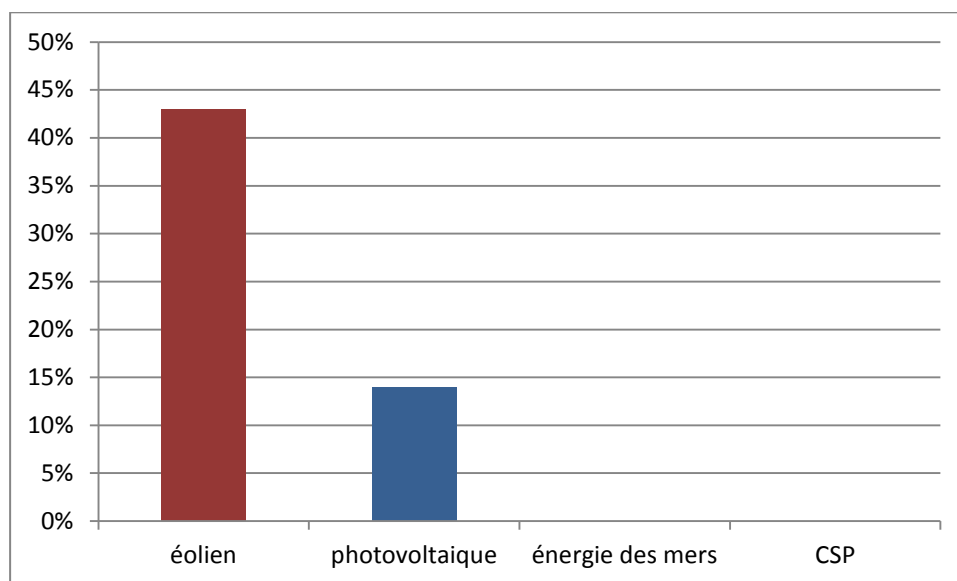


Source : auteur, à partir de la base Cordis

Une analyse approfondie des consortiums témoigne de la disparité de la proportion de nouveaux entrants associés à chacune des filières (nous distinguerons ici le domaine du photovoltaïque de celui du solaire à concentration (CSP)). C'est dans le domaine de l'éolien que la part la plus importante de projets orientés nouveaux entrants²¹⁷ est observée (43%), suivi d'assez loin par le photovoltaïque (14%). Dans les domaines des énergies des mers et du solaire à concentration, aucun projet n'est mené avec une part significativement orientée nouveaux entrants.

²¹⁷ Pour rappel, un projet est qualifié d'orienté « Nouveaux entrants » lorsqu'il inclut une part significativement supérieure de nouveaux entrants à celle des autres projets. Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

Figure 63 : Part des projets orientés « Nouveaux entrants » pour chacune des filières renouvelables étudiées



Source : auteur, à partir de la base Cordis

On remarque que les nouveaux entrants avec lesquels les électriciens interagissent dans le domaine de l'éolien sont des prestataires de conseil et d'ingénierie spécialisés, des spécialistes des travaux en haute mer (en vue de l'installation d'éoliennes offshore) et, dans une moindre mesure, des acteurs spécialisés dans la fourniture de technologies. La stratégie des électriciens ne consisterait donc pas à mener des projets en vue de co-développer une technologie avec l'aide du savoir-faire des nouveaux entrants, mais plutôt à l'acquérir en travaillant en collaboration avec des bureaux d'étude et d'ingénierie. Cette interprétation est corroborée par l'analyse des principaux domaines de dépôts de brevets : énergies des mers (30 brevets), biofuel (16), photovoltaïque (15), CSP (15) et éolien (11), soit des filières qui collaborent extrêmement peu avec les nouveaux entrants. On observe, d'ailleurs, une relation « inverse » entre le nombre de brevets déposés et le nombre de projets. A titre d'exemple, les énergies des mers font l'objet du nombre de brevets le plus important, tout en générant très peu de projets et ; réciproquement, l'éolien et le photovoltaïque représentent les segments titulaires du plus grand nombre de projets, mais de relativement peu de brevets.

Il est intéressant de comparer les stratégies de collaboration des électriciens dans les énergies renouvelables avec celles observées pour les smart grids, en raison de leurs caractéristiques communes : leur nature systémique très marquée et leur fort niveau de collaboration avec les nouveaux entrants. Alors qu'on remarque, dans le cas des smart grids, que les collaborations avec les nouveaux entrants semblent stimuler l'innovation des électriciens, on observe, dans le cas des énergies renouvelables, le phénomène inverse : les filières renouvelables titulaires du plus grand nombre de brevets déposés sont celles pour lesquelles les collaborations avec les nouveaux entrants sont les plus limitées. Ce qui tendrait à signifier que dans le cas de ces dernières, la démarche d'innovation interne est davantage stimulée par la compétition que par la collaboration avec ces nouveaux acteurs.

2.2.2.2 Conclusion

Trois enseignements se dégagent de l'analyse des brevets et projets des énergies renouvelables. Premièrement, leur place de second domaine technologique exploré par le secteur électrique, ce qu'explique leur caractère systémique. Deuxièmement, elles sont, globalement, caractérisées par une démarche d'acquisition des connaissances très peu ouverte. Si les collaborations avec les nouveaux entrants sont élevées, les niveaux de coopération et de co-construction de l'innovation sont, quant à eux, très faibles. Une double tendance révélatrice de la volonté de limiter la circulation des connaissances entre électriciens, voire de les privatiser à travers les brevets. Ces éléments peuvent se comprendre à la lumière de la compétition intense du marché des énergies renouvelables à l'échelle internationale. Il est important de signaler, ici que ces résultats diffèrent sensiblement en fonction des filières renouvelables considérées : l'éolien se caractérise par des collaborations marquées avec son écosystème. Dans cette filière, peu de brevets sont déposés, les collaborations avec les nouveaux entrants et les autres électriciens sont intenses, en raison des appels d'offres qui nécessitent de constituer des consortiums. A l'opposé, les énergies des mers et le photovoltaïque se distinguent par leur nombre élevé de brevets déposés, et l'absence de toute collaboration avec les autres électriciens ou les nouveaux entrants. Ce qui témoigne du haut niveau de compétition qui existe sur ces filières, en particulier si on les compare à l'éolien ou aux autres domaines technologiques.

Autre constat : celui de l'influence des nouveaux entrants, particulièrement présents dans les énergies renouvelables (cf. les travaux du Cleantech Group²¹⁸) qui tend à stimuler une génération plutôt interne de l'innovation. Enfin, on observe un mécanisme de compétition technologique inédit²¹⁹, qui voit se concurrencer toute une diversité de nouvelles énergies alternatives et impose aux électriciens de sélectionner, entre les différents champs possibles, ceux qu'ils souhaitent explorer. A l'échelle du secteur, cette compétition disperse mécaniquement les efforts d'innovation, génère une dynamique de développement différente selon les énergies renouvelables et sous-tend la mise en place d'autant de nouveaux paradigmes technologiques distincts, ce qui constitue, en soi, un frein supplémentaire à l'adoption de nouvelles innovations.

²¹⁸ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

²¹⁹ Cf. Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

2.2.3 Conclusion

La comparaison de l'ensemble des domaines technologiques²²⁰ mettait en évidence une démarche d'ouverture moins marquée du secteur électrique en termes d'acquisition des connaissances dans le domaine des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition. Ainsi qu'un niveau de co-construction de l'innovation plus élevé et un niveau de coopération plus faible que dans le cas des technologies d'addition. En outre, le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants, plutôt faible, ne permettait pas de distinguer les deux domaines. D'autres constats ressortent de l'analyse de l'ensemble des cas :

Premièrement, le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants plutôt faible observé pour les technologies de substitution masque le contraste entre les deux domaines, celui des énergies renouvelables (le plus élevé dans le cas des énergies renouvelables) et celui de l'hydrogène (parmi les plus faibles de l'ensemble des technologies considérées).

Deuxièmement, il n'y a pas « symétrie » entre technologies d'addition et de substitution. Dans le cas des technologies d'addition, la démarche de co-construction de l'innovation plus marquée que celle de génération interne ne constituait pas un facteur limitant l'innovation en interne (en valeur absolue, les smart grids et la fission nucléaire présentaient un nombre conséquent de brevets²²¹). Ensuite, alors que les trois domaines relevant de l'addition technologique (smart grids, CCS et nucléaire) font l'objet d'un nombre important de projets, dans le cas des technologies de substitution, la démarche de collaboration particulièrement faible, (l'hydrogène et les énergies renouvelables, respectivement 12 et 24 projets, se classent, aux deux derniers rangs de l'ensemble des technologies étudiées), mais n'induit pas, réciproquement, un nombre important de dépôt de brevets. Cet indicateur est contrasté : un nombre élevé pour les énergies renouvelables (117 entre 2007 et 2013), et très modeste pour l'hydrogène (24 sur la même période, soit le moins élevé juste derrière le CCS).

Troisièmement, contrairement aux domaines relevant de l'addition technologique, il est possible, dans une certaine mesure, de repérer les technologies de substitution à partir de la nature de leurs collaborations : l'hydrogène et les énergies renouvelables sont toutes deux caractérisées par leur peu de collaborations avec les autres électriques, ce qui représente un indice de la volonté du secteur électrique de privatiser les connaissances, en vue d'avantages compétitifs sur ces domaines particuliers.

Quatrièmement, au regard du rôle-clé dévolu aux énergies renouvelables, il est utile de réaliser un focus particulier sur ce domaine-là. Les énergies renouvelables sont amenées à connaître une croissance fulgurante dans les prochaines années et leur nature systémique impacte autant le réseau que les autres modes de production de l'électricité. Un secteur où les nouveaux entrants devraient se révéler déterminants, tant au niveau de la production que dans la fourniture des nouveaux procédés de conversion requis, et bousculer les équilibres établis.

²²⁰ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

²²¹ Pour rappel, respectivement 91 et 45 brevets ont été déposés dans les domaines des smart grids et du nucléaire, classant ces technologies au deuxième et troisième rang des technologies faisant l'objet du plus grand nombre de brevets parmi l'ensemble des technologies considérées.

Deux éléments importants ressortent de leur étude : il s'agit de la seconde technologie explorée par les électriciens derrière les smart grids (autre technologie systémique). Ensuite, le peu de collaborations entre électriciens et un dépôt de brevets conséquent, tous deux significatifs de la dynamique compétitive dans laquelle ils s'inscrivent. L'arrivée des nouveaux entrants combinée au relais de croissance significatif - et donc concurrentiel - qu'ils incarnent, stimule, en priorité, l'innovation en interne.

3.CONCLUSION

Les études de cas réalisées sur la base de l'analyse des projets et des brevets ont permis de caractériser l'introduction des cinq domaines technologiques étudiés, à l'échelle du secteur électrique européen, et de singulariser les technologies relevant de l'addition (CCS, smart grids et nucléaire) de celles relevant de la substitution (énergies renouvelables, hydrogène). Elles posent, en outre, un certain nombre de questions sur les stratégies d'innovation spécifiques des électriciens.

Premièrement, la comparaison des domaines technologiques réalisée dans la première section de ce chapitre mettait en évidence un engagement du secteur plus marqué dans les technologies d'addition par rapport à celles des technologies de substitution, infirmant ainsi notre *Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique*.

Ce résultat met en évidence un processus d'accumulation créatrice (Bergek et al, 2013). Par opposition à la notion de « destruction créatrice » (Schumpeter, 1939)²²², le concept d'accumulation créatrice représente l'idée qu'une entreprise en place innove en capitalisant sur les connaissances existantes et en élargissant son processus de recherche à des sources externes. Notons que ce résultat s'inscrit en opposition vis-à-vis des conclusions d'Horbach (2008) qui mettait en évidence que le principal facteur d'introduction des innovations environnementales concernait la réduction des coûts. Si cette dimension est amenée à jouer un rôle dans le cas du CCS, où une réglementation contraignante déprécierait la valeur des actifs responsables des émissions (« actifs échoués »), et des smart grids qui permettraient d'économiser de l'énergie à travers une meilleure gestion de la demande, la raison du coût est insuffisante pour justifier l'engagement constaté dans ces domaines.

De plus, les études de cas ont permis d'affiner ce premier résultat. Il apparaît, ainsi, que le caractère systémique des smart grids et des énergies renouvelables permet d'expliquer le fait que ces domaines représentent les deux priorités technologiques du secteur et qu'ils fassent l'objet des collaborations les plus prononcées avec les nouveaux entrants. En transformant la structure de la filière électricité, ces domaines bouleversent, bien plus que les autres champs technologiques, les équilibres établis et mettent à risque la position stratégique des électriciens.

Deuxièmement, l'analyse des domaines des smart grids et des énergies renouvelables à l'échelle des segments (smart grids) et des filières (EnR) mérite une attention particulière. Les domaines du véhicule électrique, de la gestion bas carbone des bâtiments (incluant compteurs intelligents), des énergies des mers et du photovoltaïque font l'objet du plus grand nombre de brevets déposés et de collaborations particulièrement faibles entre électriciens. Dans la mesure où ces technologies font l'objet d'une diffusion plus ou moins marquée, ce n'est pas

²²² La destruction créatrice fait référence à la destruction des compétences des entreprises en place et de leur éviction du marché au bénéfice de nouveaux entrants.

leur niveau de maturité qui permet d'expliquer ce résultat. Ces éléments signalent plutôt une volonté de ne pas laisser circuler les connaissances, de les privatiser. Et confirment l'intérêt pour le secteur électrique de maintenir ou de développer des avantages compétitifs sur ces domaines. De plus, au regard du caractère systémique de ces domaines, la question des collaborations avec les nouveaux entrants mérite une attention particulière. Alors que dans le cas des segments des smart grids (véhicule électrique, gestion bas carbone des bâtiments), les collaborations avec les nouveaux entrants sont marquées, elles ne sont pas significatives dans le cas des énergies des mers et du photovoltaïque, alors que ces filières et segments sont caractérisés par l'arrivée de nouveaux entrants (adjacents ou start up). Cela signifie que, si dans les deux cas, la présence des nouveaux entrants stimule la génération interne de l'innovation, dans le cas des smart grids, les électriciens collaborent avec les nouveaux entrants alors que, dans le second cas, les électriciens sont en concurrence plus frontale avec les nouveaux entrants.

Troisièmement, notre analyse a permis d'identifier le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances selon le domaine technologique. Contrairement à ce que nous formulons dans l'*Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition*, les études de cas ont mis en évidence que ce sont les technologies relevant de l'addition qui font l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que, dans la mesure où le CCS, les smart grids et la fission nucléaire s'appuient sur des technologies déjà explorées par les électriciens²²³, l'introduction d'innovation dans ces domaines peut s'appuyer sur un réseau de partenaires déjà établi alors que dans le cas des technologies de substitution technologique, ces réseaux doivent être constitués.

De plus, alors que les technologies d'addition se distinguent par un processus d'introduction marqué par un niveau élevé de « Co-construction de l'innovation », nous observons, à l'opposé, que c'est plutôt la génération interne de l'innovation qui caractérise les technologies relevant de la substitution. En outre, alors qu'il n'est pas possible de spécifier les technologies d'addition sur la base de la nature des partenaires des électriciens, il apparaît que les technologies de substitution disposent toutes du point commun de faire l'objet d'un faible niveau de collaboration entre électriciens. Il est d'ailleurs intéressant de noter que le CCS, relevant de l'addition technologique, fait l'objet d'un niveau de co-construction de l'innovation et d'un niveau de coopération particulièrement élevé.

Quatrièmement, les études de cas posent la question de la nature des avantages compétitifs dont peuvent faire l'objet les différents domaines technologiques. A la lumière des études de cas, il apparaît que, pour maintenir ou développer ses avantages compétitifs, les acteurs du secteur utilisent deux principaux leviers. D'une part, ils limitent l'accès à l'information des autres électriciens en minimisant les coopérations avec eux à l'occasion des projets. D'autre part, ils protègent les inventions développées en déposant des brevets. Ce second levier est

²²³ La fission est une technologie en service depuis quarante ans ; dès l'origine de l'électricité, les réseaux furent au cœur du système électrique et les technologies de capture consistent à améliorer des procédés thermiques largement répandus.

particulièrement notable dans la mesure où les innovations du secteur électrique sont, pour la plupart d'entre elles, des innovations de « procédé ». Contrairement aux innovations de « produit », elles sont moins exposées au risque de « rétro-engineering » et donc font le plus souvent l'objet d'une stratégie de secret²²⁴ que de brevet. Cela signifie que lorsqu'une innovation de procédé fait l'objet d'une compétition internationale intense (nucléaire, énergies renouvelables) ou bien qu'elle est susceptible de conduire à de nouveaux usages (véhicules électriques) ou de nouvelles applications (gestion bas carbone des bâtiments), elle disposerait de caractéristiques semblables à celles des innovations de « produit ».

²²⁴ Une stratégie de secret consiste à ne pas rendre public la nature des inventions développées et donc de se prémunir contre les imitateurs qui pourraient librement utiliser l'invention sans avoir été exposé ni au risque ni au coût du processus d'innovation. Cf. Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

CHAPITRE V – ANALYSE DES STRATEGIES D'INNOVATION DES ELECTRICIENS EUROPEENS

L'Europe a fixé les objectifs de lutte contre le changement climatique les plus ambitieux à l'échelle internationale et mobilise, pour les atteindre, une large variété d'instruments économiques. Les objectifs de moyen (le 3*20 de 2020) et long termes (le « facteur 4 » de 2050) placent les électriciens sous une contrainte d'évolution de leur portefeuille de technologies et d'introductions d'innovations, dans un contexte de libéralisation des marchés ne valorisant pas nécessairement les dépenses de R&D²²⁵.

Dans les chapitres précédents, nous mettons en évidence l'importance de différents domaines technologiques (smart grids, nucléaire, énergies renouvelables, CCS et hydrogène) dans la transition énergétique du secteur électrique. En outre, le chapitre précédent a proposé d'analyser l'introduction de ces domaines à l'échelle du secteur électrique européen en distinguant les innovations relevant de l'addition technologique (CCS, nucléaire et smart grids) de celles qui concernent la substitution technologique (énergies renouvelables et hydrogène). Afin d'analyser le secteur, nous avons agrégé les informations des brevets et des projets des six plus importants électriciens européens : EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE. A travers des indicateurs construits à partir des brevets et des projets, nous avons, d'une part, identifié l'intensité de l'engagement du secteur dans chacun de ces domaines, ce qui a permis de révéler les domaines d'innovation prioritaires et, d'autre part, apprécié le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances, signalant, au-delà de l'intensité de l'engagement, les efforts du secteur pour les adopter.

Les travaux ont abouti aux trois principaux résultats suivants, soulevant un certain nombre de questions sur les différentes stratégies d'innovation mises en œuvre par les cinq électriciens étudiés.

Premièrement, alors que les technologies relevant de la substitution sont amenées à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique et qu'elles bénéficient en Europe des dépenses de R&D les plus élevées de la part des acteurs privés²²⁶, il apparaît qu'au niveau du secteur électrique, elles font l'objet d'une exploration moins marquée que les technologies relevant de l'addition. Au-delà de ce résultat, l'analyse sectorielle réalisée dans la partie précédente tend à indiquer que c'est le caractère systémique des technologies qui permet d'expliquer l'engagement des électriciens (les énergies renouvelables et les smart grids, qui sont plus systémiques que les autres technologies, se classant au premier rang des technologies explorées). Ce résultat pose les questions suivantes. Les électriciens à l'origine de la quantité la plus élevée d'émission de CO₂ par unité d'électricité produite, explorent-ils dans des proportions supérieures les technologies de substitution ? Les technologies systémiques sont-

²²⁵ A l'occasion d'une revue de la littérature portant sur l'innovation dans le secteur électrique, Jamasb et Pollit (2006) et Salies (2011) mettent en évidence une diminution des dépenses de R&D des acteurs du secteur électrique qu'ils attribuent à la libéralisation des marchés de l'énergie.

²²⁶ Cf. Chapitre IV, section [1.Comparaison des domaines technologiques](#).

elles celles qui font l'objet d'une exploration plus marquée pour chacun des électriciens? Plus globalement, la stratégie technologique de chacun des acteurs est-elle sensiblement la même ou radicalement différente ?

Deuxièmement, alors que les électriciens ont des connaissances en construction dans les technologies de substitution comparativement à celles dont ils disposent dans les technologies relevant de l'addition, l'acquisition des connaissances des premières devrait faire l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée que les secondes. Or, il apparaît qu'au niveau du secteur, ce sont les technologies relevant de l'addition qui font l'objet d'une démarche d'ouverture plus soutenue. Ce résultat nous conduit à nous interroger sur les éléments suivants. Les électriciens les plus émetteurs, qui devront donc effectuer les efforts les plus soutenus pour réaliser la transition énergétique, ont-ils une démarche d'acquisition des connaissances plus ouvertes que les moins émetteurs ? Comment se caractérisent les stratégies d'acquisition des connaissances pour chacun des électriciens ?

Troisièmement, il apparaît que les technologies de substitution se distinguent de celles relevant de l'addition, d'une part, par une génération interne de l'innovation qui est plus marquée que la co-construction avec l'écosystème et, d'autre part, par des coopérations plus intenses entre électriciens. Dans ces conditions, nous pouvons nous demander si le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition ne serait qu'une conséquence du positionnement technologique, ou si, au-contre, elle fait l'objet d'une stratégie « formalisée » quelles que soient les technologies explorées et leurs caractéristiques sous-jacentes ?

Ces questions sont d'autant plus importantes au regard de la variété des électriciens étudiés : EDF, Enel, Engie, E.ON Iberdrola et RWE qui évoluent dans des pays domestiques (Allemagne, Espagne, France et Italie) dont les politiques énergétiques successivement menées ont abouti à des profils énergétiques (mix énergétique, émission de CO₂ par unité d'électricité produite) très différents.

Nous proposons, dans cette partie, de comparer et de caractériser les stratégies d'innovation des électriciens que nous appréhenderons à travers la stratégie technologique et la stratégie d'acquisition des connaissances²²⁷. Cette partie sera articulée autour des deux sections suivantes.

Tout d'abord, nous comparerons les stratégies d'innovation des électriciens dans le but de vérifier les deux hypothèses suivantes :

- *Hypothèse 3 : les électriciens, dont l'intensité carbone est la plus élevée, font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs.*
- *Hypothèse 4 : les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte.*

²²⁷ Cf. le cadre d'analyse présenté dans le Chapitre III, section [1.Délimitation d'un cadre d'analyse](#).

Ensuite, nous réaliserons six études de cas portant sur EDF, Enel, Engie, E.ON Iberdrola et RWE. Ces études viseront à caractériser la stratégie technologique des électriciens et la stratégie d'acquisition des connaissances. Dans cette optique, nous nous appuyerons sur le cadre d'analyse d'inspiration évolutionniste et la méthodologie²²⁸ déjà mobilisés pour analyser les domaines technologiques dans le chapitre précédent.

²²⁸ Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

1. COMPARAISON DES ELECTRICIENS

De l'analyse de l'innovation du secteur électrique menée précédemment ressortent deux grandes tendances. Bien que globalement les technologies d'addition soient privilégiées à celles de substitution, deux priorités technologiques s'affirment fortement, du fait de leur nature systémique : les smart grids et les énergies renouvelables. Ainsi que la démarche d'ouverture plus marquée, dans l'acquisition des connaissances, des technologies d'addition, alors même celles de substitution devraient jouer un rôle clé dans la transition bas carbone (en particulier les énergies renouvelables²²⁹).

Cependant, au vu de la diversité des caractéristiques et des enjeux de chacun des électriciens étudiés²³⁰, les résultats à l'échelle du secteur doivent impérativement se doubler d'une analyse à l'échelle des électriciens, via une comparaison de leur stratégie d'innovation mise en perspective avec leur intensité carbone respective.

En préalable, quelques éléments sur les efforts consentis en faveur de l'innovation, qui se dégagent du calcul de l'intensité R&D²³¹ moyenne sur la période 2007-2013. Bien que cette évaluation ne soit que très partiellement représentative de leur degré d'innovation²³², elle se révèle, toutefois, utilisée à des fins comparatives, assez révélatrice des écarts entre électriciens.

Figure 65 : Comparaison de l'intensité R&D moyenne des six électriciens étudiés sur la période 2007-2013

	Participation de l'Etat (%)	CA Moyen (M€)	Budget R&D moyen (M€)	Intensité R&D moyenne (%)
EDF	84,9	66 471,43	474	0,71
RWE	-	50 215,86	187	0,37
Iberdrola	-	28 044,14	106	0,37
Engie	33,3	82 935,57	184	0,22
E.ON	-	98 479,57	99	0,1
Enel	25,5	69 651,29	74	0,1

Source : rapports d'activité des six électriciens étudiés pour les années 2007 à 2013.

Des résultats qu'il est intéressant de mettre en parallèle avec les travaux de Sterlacchini (2010)²³³. L'auteur démontrait que si les dépenses de R&D des électriciens ont chuté entre le début et le milieu des années 2000 en raison de la libéralisation des marchés de l'électricité,

²²⁹ Cf. Chapitre I, section [2.2 Le cas du secteur électrique en Europe](#).

²³⁰ Cf. Chapitre V, section [2. Etudes de cas](#).

²³¹ L'intensité R&D est mesurée par le rapport entre le budget consacré à la recherche et développement et le chiffre d'affaires.

²³² Cf. Chapitre III, section [2.2 Le choix des brevets et des projets comme proxy de l'innovation](#).

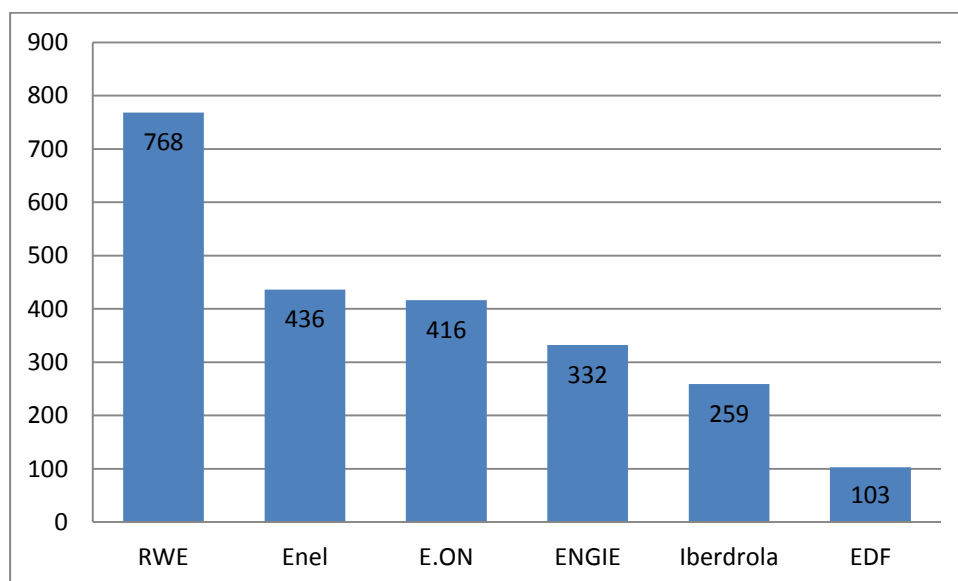
²³³ Dans cette étude l'auteur comparait notamment l'évolution des dépenses de R&D de dix électriciens mondiaux faisant l'objet d'une participation plus ou moins marquée de l'Etat à leur capital.

les plus touchées ont été les entreprises détenues par des investisseurs privés. Notre approche, qui, contrairement à celle de Sterlacchini, n'est pas anglée sur la dynamique des efforts mais sur leur niveau absolu, nuance ces résultats. La présence au capital de l'Etat ne permet pas, à elle seule, d'expliquer les écarts observés : RWE, qui ne comprend pas de participation de l'Etat allemand, se classe au second rang des électriciens en termes d'intensité R&D, tandis qu'Enel, détenu à hauteur de 25% par l'Etat italien, arrive bon dernier sur ce critère.

On remarque également la disparité de l'effort d'innovation dans des proportions d'un facteur un à sept entre l'électricien à l'intensité R&D la plus élevée (EDF, 0,7%), et ceux pour lesquels elle est la plus faible (Enel et E.ON, 0,1%). Un gouffre dont on peut se demander s'il est corrélé au profil des électriciens : soit en tant que générateur d'innovation, pour ceux dont l'intensité R&D est la plus élevée soit réciproquement, d'adopteurs, pour ceux dont elle est la plus faible. Et d'autre part, si la variété des technologies explorées y est, elle aussi, indexée.

Autre critère clivant : le niveau respectif de l'intensité carbone de la production électrique de chacun des électriciens, qui ressort de l'étude « facteur carbone » publiée chaque année par PwC (Figure 66).

Figure 66 : Comparaison de l'intensité carbone moyenne sur la période 2007-2013 de la production d'électricité en Europe d'EDF, Enel, E.ON, Engie, Iberdrola et RWE (gCO₂/KWh)



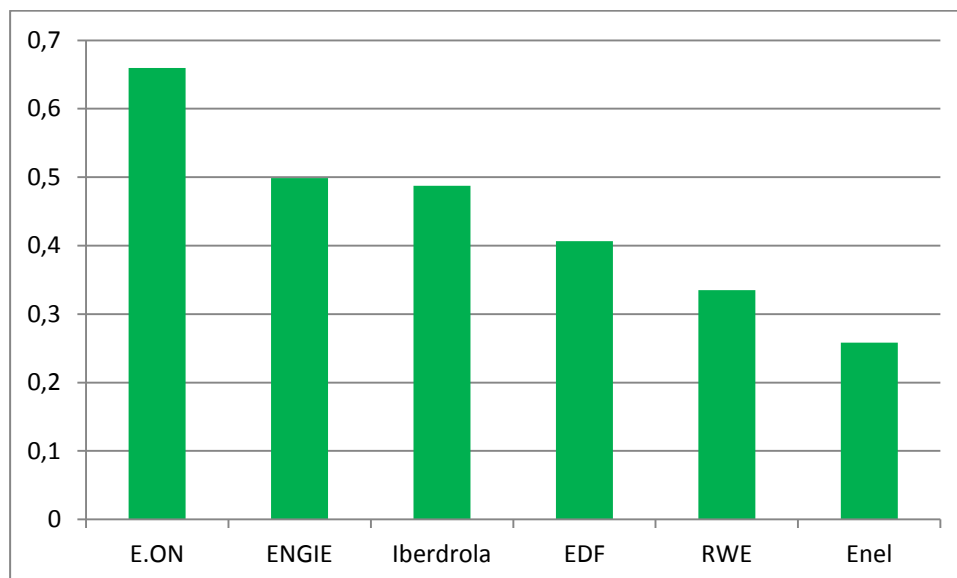
Source : auteur à partir des intensités carbone relevées par PwC pour les années 2007 à 2013

L'intensité carbone varie là encore d'un facteur un à sept entre EDF, la plus faible et RWE, la plus élevée. L'enjeu de la transition énergétique requiert à l'évidence un effort plus soutenu de la part de ces derniers. D'où l'*Hypothèse 3* formulée : *les électriciens dont l'intensité carbone est la plus élevée (RWE, Enel, E.ON) font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs (EDF, Iberdrola et Engie)*. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons construit un indicateur²³⁴ à même de mesurer l'intensité

²³⁴ Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

de l'engagement des électriciens dans les technologies relevant de l'addition ou de la substitution.

Figure 67 : Comparaison du niveau d'engagement des électriciens dans les technologies relevant de la substitution technologique



Source : auteur

On constate que deux des trois électriciens les plus émetteurs (Enel et RWE) s'avèrent être les moins engagés dans la substitution technologique, alors que le troisième, E.ON fait figure d'exception, puisqu'il se classe en première position sur ce critère. Des niveaux d'engagement globalement contrastés qui ne laissent, pour l'heure, que présager de stratégies technologiques divergentes²³⁵. Ces éléments permettent d'infirmer l'*Hypothèse 3*.

Nous allons, ensuite, vérifier notre *Hypothèse 4*²³⁶, à savoir la corrélation entre l'intensité carbone et le degré d'ouverture dans l'acquisition des nouvelles connaissances. Une hypothèse motivée par deux facteurs : parce que les électriciens les plus émetteurs, sont, par définition, ce qui s'appuient le plus sur les énergies fossiles, ils devraient naturellement être les plus avides de développer de nouvelles connaissances sur les technologies bas carbone. Et, selon la même logique, également les plus demandeurs de collaborations avec l'ensemble de l'écosystème, qui constituent un puissant levier pour faciliter l'introduction des innovations environnementales²³⁷.

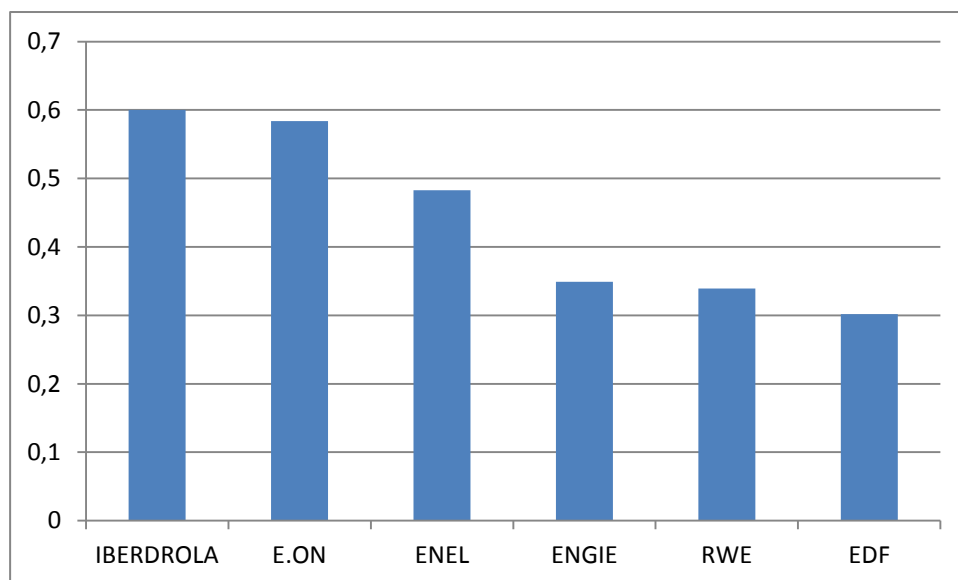
²³⁵ Les études de cas consacrées à chacun des électriciens permettront d'approfondir ce point. Cf. Chapitre V, section [2. Etudes de cas](#).

²³⁶ Pour rappel, l'Hypothèse 4 est la suivante : *les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte*.

²³⁷ Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des technologies](#).

A cet effet, nous avons construit un indicateur selon les mêmes méthodologies²³⁸ et critères²³⁹ que retenus dans la partie précédente pour mesurer la démarche d'ouverture du secteur à l'égard des domaines technologiques étudiés.

Figure 68 : Comparaison du niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances par les électriciens



Source : auteur

Cet indicateur permet de valider en grande partie *l'Hypothèse 4* : deux des électriciens les plus émetteurs (E.ON et Enel) mettent en œuvre une démarche d'acquisition des connaissances notablement ouverte, alors, qu'inversement, deux des trois électriciens à l'intensité carbone la plus faible (EDF et Engie) s'inscrivent dans une démarche plutôt fermée.

Des travaux utiles pour une vue d'ensemble des électriciens sur la base de leur dépendance aux énergies fossiles, mais qui en appellent, désormais, à une étude de cas individuelle, afin de préciser, pour chacun, leur tendance d'innovation respective sur les critères de stratégie technologique et de modalité d'acquisition des connaissances.

²³⁸ Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

²³⁹ Il s'agit du niveau de co-construction de l'innovation, le niveau de coopération et le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants.

2. ETUDES DE CAS

La comparaison d'ensemble des électriciens met en avant le lien entre les stratégies mises en œuvre et le niveau de l'intensité carbone. Cette vision globale nécessite d'être approfondie à l'échelle individuelle des électriciens, par une analyse détaillée de leur stratégie technologique d'abord, puis de leur stratégie d'acquisition des connaissances, en cela appuyée sur différentes sources (en particulier, les informations présentées dans leur rapport annuel) et dans la perspective des enjeux propres à chacun, de leur profil énergétique ou leur diversification géographique.

L'analyse de la stratégie technologique, d'abord, devra permettre de préciser le positionnement de chaque électricien, à savoir s'il se concentre davantage sur les innovations relevant de la substitution ou de l'addition technologique. Et d'identifier ses priorités, en confirmant, au cas par cas, si les innovations systémiques se révèlent être prioritaires, comme nous l'observons à l'échelle du secteur, ou si d'autres axes privilégiés se dégagent.

L'analyse de la stratégie d'acquisition des connaissances des électriciens, ensuite, cherchera à identifier la nature et l'intensité de leur démarche d'ouverture, en caractérisant leur positionnement sur chacun des critères suivants : collaboration avec les nouveaux entrants, coopération entre électriciens et co-construction de l'innovation.

En outre, les études de cas devraient répondre à des questionnements soulevés par l'analyse des domaines technologiques : mesurer leur capacité à s'appuyer sur des collaborations externes plutôt que sur la génération interne de l'innovation, et comprendre si l'intensité de ces collaborations (avec les nouveaux entrants et avec les autres électriciens) est dépendante de leur stratégie technologique ou, au contraire, si elle s'inscrit dans une stratégie formalisée indépendamment de leur engagement sur telle ou telle technologie.

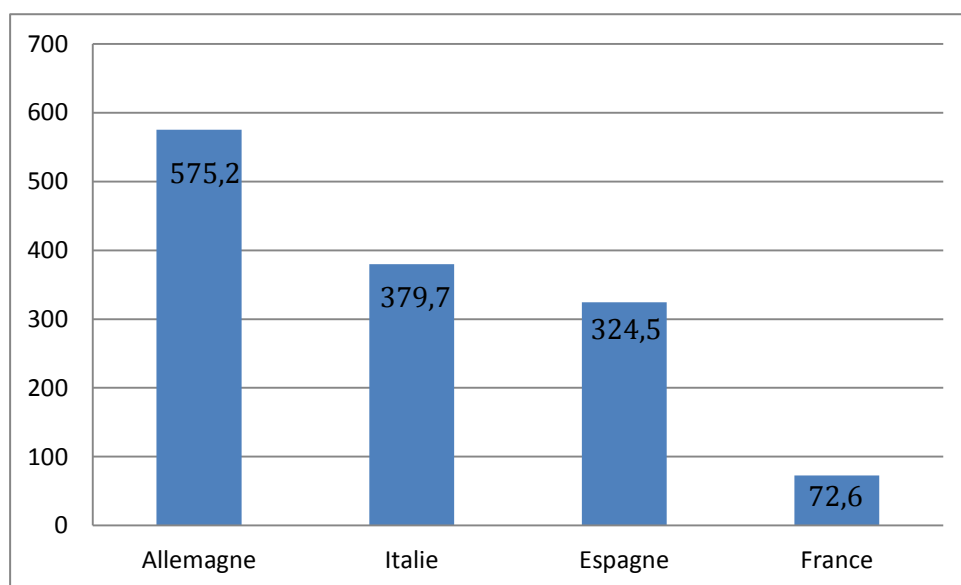
Mais, au préalable, il est indispensable de bien cerner les enjeux en matière de transition énergétique des pays domestiques des électriciens concernés : la France (EDF et Engie), l'Italie (Enel), l'Espagne (Iberdrola), l'Allemagne (E.ON et RWE). Si le marché européen de l'électricité traverse dans son ensemble une crise aigüe, la situation est fort dissemblable d'un pays à l'autre en raison de la variété de leur profil énergétique ; d'où des politiques énergétiques contrastées pour lutter contre le réchauffement climatique.

2.1 LES ENJEUX DES PRINCIPAUX PAYS EUROPEENS VIS-A-VIS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE

La question de la transition énergétique du secteur électrique de chaque pays considéré se construit selon sa logique propre, en raison du contexte spécifique à chacun ; elle est définie, en premier lieu, par l'intensité carbone de la production électrique, les prix de l'électricité et le solde commercial des flux d'électricité.

La production d'un kilowattheure d'électricité ne génère pas la même quantité d'émissions de CO₂ pour chacun des pays. On retrouve, à une extrémité du spectre, la France qui se distingue par sa singulièrement faible intensité carbone et, à l'opposé, l'Allemagne dont l'intensité est presque huit fois supérieure. Des écarts dus, comme nous le verrons ultérieurement, à la composition de leur mix énergétique respectif plus ou moins appuyé sur des énergies renouvelables.

Figure 69 : Comparaison de l'intensité carbone moyenne de l'Allemagne, de l'Italie, de l'Espagne et de la France pour la période 2007-2012



Source : auteur à partir des données Eurostat et des estimations CDC Climat Recherche (2013) pour la consommation électrique et à partir des données EUTL et World Electric Power Plant (Platts) pour les émissions de CO₂.

En outre, si le secteur de l'électricité traverse actuellement une crise à l'échelle européenne ; sa gravité varie selon les pays. Afin de limiter les émissions de CO₂, l'Europe s'est fixé les objectifs les plus ambitieux du monde²⁴⁰, obligeant les Etats membres à s'engager sur des trajectoires contraignantes. La plupart d'entre eux ont répondu en mettant en place des mécanismes de « tarifs de rachat » pour subventionner la production d'électricité renouvelable et la rendre compétitive face à l'électricité produite à partir des ressources conventionnelles.

²⁴⁰ Pour rappel, l'Europe prévoit de réduire d'ici à 2020 de 20% les émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990 et d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie à 27% d'ici 2030. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le cas du secteur électrique en Europe](#).

Si ces mécanismes ont certes provoqué une augmentation de la production d'électricité renouvelable significative entre 2007 et 2013²⁴¹, ils ont, pour certains, également participé à entraîner le secteur électrique dans une crise sans précédent. L'introduction des énergies renouvelables, dont l'accès au réseau est prioritaire, a créé une surcapacité de production, donc restreint le recours aux centrales thermiques, au point d'acculer plusieurs pays à en fermer une partie. De plus, dans la mesure où le coût du gaz est plus élevé que celui du charbon²⁴², les pays les plus dépendants de cette technologie ont été le plus fortement pénalisés. C'est, par exemple, le cas de l'Italie. Notons, également, le rôle de la baisse de la demande d'électricité²⁴³, qui diverge d'un pays à l'autre. C'est sur ce point encore, l'Italie qui a été l'un des pays les plus affectés²⁴⁴.

Enfin, le prix de l'électricité est très différent d'un pays à l'autre. Il évolue, pour les particuliers, du simple au double entre la France (dont le coût est particulièrement compétitif en raison du recours massif au nucléaire²⁴⁵) et l'Allemagne et, pour l'industrie, dans des proportions encore supérieures entre la France et l'Italie. Le coût des matières premières, plus ou moins élevé selon le mix électrique en présence, ou le niveau des taxes, en particulier dans le cadre des politiques de soutien aux énergies renouvelables, expliquent ces écarts.

Figure 70 : Comparaison des prix de l'électricité pour l'Allemagne, l'Espagne, la France et l'Italie en 2014

	Prix de l'électricité (€/kWh)			
	Particulier		Industrie	
	2012-S2	2013-S2	2012-S2	2013-S2
<i>EU-28</i>	<i>0,195</i>	<i>0,202</i>	<i>0,116</i>	<i>0,118</i>
Allemagne	0,268	0,292	0,13	0,144
Espagne	0,228	0,227	0,12	0,12
France	0,145	0,159	0,079	0,085
Italie	0,23	0,232	0,178	0,172

Source : Eurostat

Du fait de ces divergences, certains se trouvent en position d'importateur d'électricité et d'autres en position d'exportateur. Ainsi, la France, qui commercialise chaque année à l'étranger environ 15% de sa production, est le premier exportateur mondial d'électricité, et, à l'opposé, l'Italie le premier importateur d'électricité européen. Un facteur qui contribue à expliquer pourquoi chacun des Etats souhaite renforcer le réseau transfrontalier.

²⁴¹ Cf. Chapitre IV, section [2.2.2 Les énergies renouvelables](#).

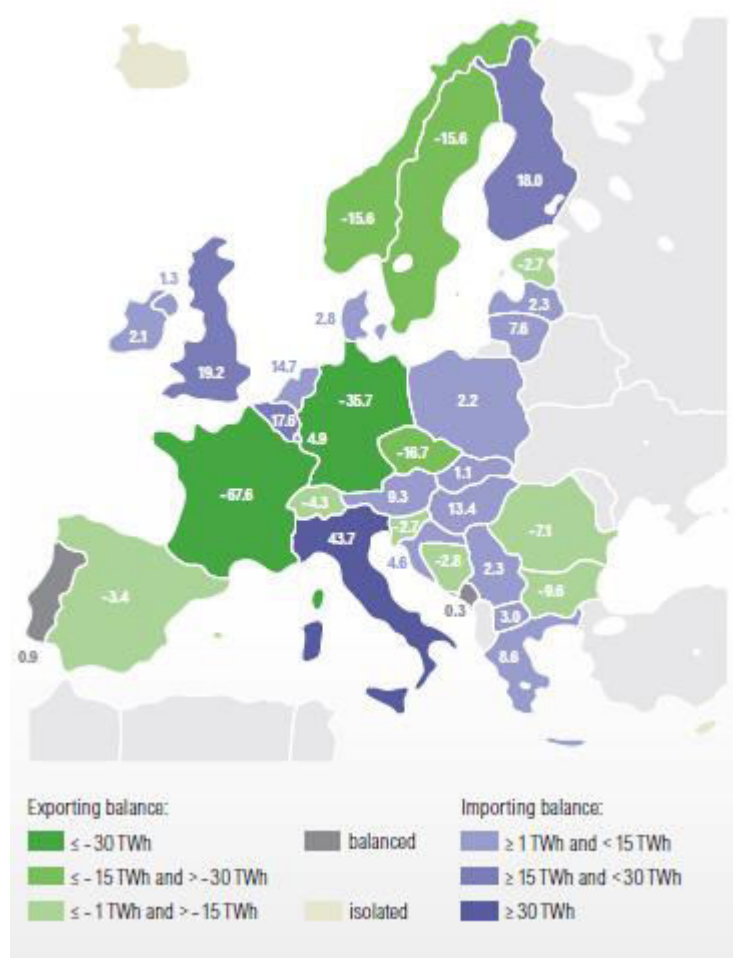
²⁴² Le charbon, responsable d'une quantité d'émission de CO₂ supérieure à celle rejetée par le gaz pour la même quantité d'électricité produite, aurait pu être moins compétitif que le gaz si le prix de la tonne de CO₂ sur le marché des quotas avait été suffisamment élevé.

²⁴³ La consommation électrique atteignait 3288 TWh en 2013 contre 3367 TWh en 2010. Trois raisons permettent d'expliquer ce phénomène. Tout d'abord, les conditions météorologiques, plus fraîches en été et moins chaudes en hiver conduisent à diminuer l'usage des chauffages et des climatiseurs durant ces périodes ; ensuite, le ralentissement économique dans un contexte de crise et la délocalisation de certaines activités hors d'Europe. Enfin, des progrès d'efficacité énergétique ont été réalisés dans l'éclairage, les bâtiments et les équipements nécessitant une quantité inférieure d'électricité pour fonctionner.

²⁴⁴ Cf. Chapitre V, section [2.1.3 Le secteur de l'électricité en Italie, un marché en crise](#).

²⁴⁵ Cf. Chapitre V, section [2.1.2 La France un modèle de bouquet énergétique décarboné et compétitif](#).

Figure 71 : Balance des échanges de l'électricité en 2014



Source : ENTSO-E (2014)

Des considérations générales qui, au vu de la diversité énergétique des pays considérés, ne peuvent se dispenser d'une analyse plus fine, à l'échelle individuelle, du profil énergétique de chacun, de ses objectifs en matière de lutte contre le changement climatique et des leviers mobilisés à ces fins.

2.1.1 L'Allemagne : « l'Energiewende » en marche pour un engagement résolu en faveur des énergies renouvelables

En 2015, l'Allemagne est en tête des pays européens en termes de capacité de production photovoltaïque et éolienne, qui atteignent, selon la BDEW²⁴⁶, respectivement 38,5 GW et 45 GW ; mais c'est aussi le pays qui recourt le plus au charbon. L'intensité carbone moyenne de sa production électrique entre 2007 et 2012 s'élève à hauteur de 575,2 gCO₂/KWh, soit le niveau le plus haut des pays considérés.

²⁴⁶ La BDEW est l'agence allemande pour l'énergie et l'eau.

Le mix électrique de l'Allemagne a toujours été riche en charbon en raison de l'abondance de cette ressource sur le territoire. En 1991, le charbon représentait près de 60% des capacités installées, part qui est descendue à environ 45% en 2010, alors même que, sur cette période, la production d'électricité a crû de 10%. Une transformation du mix énergétique pour l'essentiel liée à l'utilisation croissante des ressources renouvelables et du gaz. Cependant, on assiste, depuis 2011, à un renouveau du recours au charbon au détriment du gaz, en raison de la baisse mondiale du prix du charbon, devenu plus compétitif que le gaz en Europe, associée au dysfonctionnement du marché de quotas de CO₂, qui aurait dû permettre de compenser ce différentiel de compétitivité²⁴⁷. Selon l'agence allemande pour l'énergie et l'eau, la production d'électricité allemande se répartit de la manière suivante : 42,2 %, pour le charbon, suivi du nucléaire (14,1%), de l'éolien (13,3%), de la biomasse (7,7%), du photovoltaïque (5,9%), de l'hydroélectricité (3,1%), du gaz naturel (8,8%) et autres (4,9%).

En 2011, à la suite de la catastrophe de Fukushima, le gouvernement fédéral allemand a opéré un virage clé dans sa politique énergétique, en réévaluant les risques présentés par l'énergie nucléaire et décidé de s'en affranchir totalement. Alors que le nucléaire représentait 25% du mix électrique allemand cette même année, le Bundestag (Parlement) et le Bundesrat (Conseil fédéral représentant les « Länder ») ont adopté un « paquet législatif énergie » comprenant onze textes programmant une sortie accélérée du nucléaire d'ici 2022 et un accroissement du développement des énergies renouvelables, assorties d'ajustements au niveau du réseau. Dès son adoption, les sept plus vieilles centrales nucléaires et la centrale de Krümmel ont été mises à l'arrêt. Les neuf centrales restantes, qui produisaient encore 16 % de l'électricité du pays en 2014, seront progressivement arrêtées d'ici 2022.

L'Allemagne a misé très tôt sur les avantages des énergies renouvelables en soutenant dès la fin des années 1990 la production d'électricité en provenance des énergies propres ; selon l'Office franco-allemand pour les énergies renouvelables, elles seraient, en 2014, la première source de production d'électricité²⁴⁸. En 2015, selon les statistiques du GWEC, environ 12 800 MW de capacité éolienne sont installés dans l'Union européenne, dont près de 47% uniquement en Allemagne, soit 6 GW (à titre de comparaison, la Chine a installé, avec 30,5 GW, près de la moitié des nouvelles capacités éoliennes dans le monde). Concernant le photovoltaïque, la puissance totale s'élève à 38,3 GW en 2014, dont 1,8 GW installée cette même année (Observ'ER, 2015), et l'Allemagne se place, en 2015, en tête des producteurs devant la Chine, l'Espagne et le Japon, avec 34 TWh d'électricité produite à partir de ces unités. La stratégie de déploiement des énergies renouvelables préconisée par le programme énergétique « Energie Konzept 2050 » présenté en 2010, fixe les grandes orientations de la politique allemande d'ici 2050 : porter la part des énergies renouvelables à 35 % d'ici 2020 et à 80 % à horizon 2050. Alors même que l'Allemagne est confrontée à plusieurs obstacles. Elle ne bénéficie pas de conditions de vent et d'ensoleillement particulièrement favorables, sa capacité hydraulique est déjà presque saturée, et les coûts de l'électricité à partir de l'éolien terrestre et du solaire photovoltaïque sont mal maîtrisés, d'où des surcoûts élevés, qui

²⁴⁷ Pour un kilowattheure produit, le gaz est à l'origine d'une quantité d'émissions inférieures de CO₂ que le charbon.

²⁴⁸ Ce résultat peut être nuancé dans la mesure où, en agrégeant la production d'électricité à partir de houille et de lignite, le charbon atteindrait la part de 45%.

touchent, en particulier, les ménages²⁴⁹. Le gouvernement allemand a donc été contraint de revoir le système initial de soutien, afin de mieux contrôler l'ajout de capacités de production renouvelable, avec la loi EEG²⁵⁰, entrée en vigueur au 1^{er} août 2014, qui fixe des plafonds pour les nouvelles constructions et prévoit le remplacement des tarifs d'achat par des primes de marché. C'est dans ce contexte de recours massif aux énergies renouvelables qui posent, en outre, le défi de la gestion de l'intermittence, de sortie du nucléaire et de perte de compétitivité des centrales à gaz en Europe, que l'Allemagne a préféré, dans cette phase de transition, le charbon au gaz, moins cher que ce dernier - mais bien plus émetteur.

Pour faire face à l'introduction massive des énergies renouvelables, le réseau et le système d'approvisionnement électriques connaissent une mutation radicale, qui passe par l'amélioration du réseau, contraint de devenir « intelligent », et « communicant ». Dans un contexte de baisse de la consommation électrique, l'introduction d'électricité renouvelable en quantité importante, et prioritaire sur le réseau, tend à faire chuter le coût de l'électricité. En 2014, l'Allemagne exporte donc 35 GWh de son électricité, notamment à destination des Pays-Bas, de l'Autriche et de la Suisse mais aussi de la France, en particulier en hiver lorsque les besoins de pointe sont les plus importants. Il lui est donc nécessaire d'améliorer la robustesse de ses réseaux pour assurer la sécurité du secteur électrique européen et multiplier les échanges. A titre d'exemple, le 25 décembre 2012, la puissance éolienne allemande a dépassé les 18000 MW, ce qui a fait chuter le cours de l'électricité à – 200 €/MWh pendant 7 heures consécutives, et l'a contraint à déboursier plus de 40 M€ à l'intention de ses acheteurs, pour qu'ils la débarrassent de 208 000 MWh indésirables, qui menaçaient de faire disjoncter en chaîne le réseau allemand. Signalons que l'augmentation des exportations allemandes n'est pas « un indice d'une situation rassurante en Allemagne », contrairement à ce qu'affirme Hildegard Müller²⁵¹, directrice générale du BDEW (la fédération allemande de l'énergie), en évoquant les nombreuses demandes de fermetures de centrales auprès du régulateur. Car ces centrales sont indispensables en période de pointe, pour continuer de pallier l'intermittence des énergies renouvelables, tant que la technologie de stockage n'est pas encore suffisamment développée. Dernier chantier en cours : l'Allemagne doit construire de nouvelles lignes à haute tension pour acheminer l'électricité éolienne produite au Nord vers les centres de consommation au Sud. L'un des projets principaux, NordLink, est toutefois contesté par les populations habitant à proximité du tracé prévu.

Quatre principales entreprises se partagent, dans le pays, le marché de la production d'électricité en 2015 : E.ON, RWE et EnBW et le suédois Vattenfall. Le transport de l'électricité est divisé en quatre zones, chacune raccordée à un opérateur de réseau : Amprion, TransnetBW, TenneT TSO GmbH, 50 Hertz Transmission, et les opérateurs de réseau regroupés dans un organisme de coordination, le Netzregolverbund. Enfin la distribution de

²⁴⁹ Les ménages allemands ont payé leurs KWh d'électricité presque 50% plus cher que les ménages français en 2013 (0,1493 € contre 0,1007 €). Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

²⁵⁰ <http://www.bmwi.de/Francais/Redaktion/PDF/loi-sur-les-energies-renouvelables-eeg-2014,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=fr,rwb=true.pdf>

²⁵¹ http://www.lesechos.fr/15/01/2014/LesEchos/21605-088-ECH_l-alle-magne-exporte-de-plus-en-plus-d-electricite-vers-la-france.htm

l'électricité est tout particulièrement atomisée : on ne dénombre pas moins de 900 opérateurs de réseau de distribution actifs. Notons qu'un mouvement de « municipalisation » des réseaux de distribution s'est développé à la faveur de centaines de renouvellement de concessions arrivant à échéance en 2016 : environ 170 d'entre eux ont été repris en main par les villes et plus de 70 nouvelles régies municipales créées depuis 2007.

Dans la mesure où l'Allemagne ne peut sortir concomitamment du nucléaire et du charbon, le charbon devrait servir d'énergie de transition pour parvenir à l'ère du renouvelable à moindre coût. L'Allemagne devra veiller à faire cohabiter, en toute sécurité, l'offre d'énergie décentralisée et centralisée et à améliorer les réseaux en conséquence : car, d'un côté, les investissements dans l'éolien offshore renforcent une structure énergétique centralisée et de l'autre, l'éolien terrestre et le solaire relèvent d'une production décentralisée.

2.1.2 La France : un modèle de bouquet énergétique décarboné et compétitif

La France est le pays dans lequel la proportion de nucléaire dans le mix électrique est la plus élevée du monde. Ce qui lui permet d'émettre une quantité de CO₂ et de disposer d'un coût de l'électricité parmi les plus bas des pays européens - elle est conséquemment le premier exportateur d'électricité en Europe²⁵².

Les interconnexions avec les pays voisins contribuent, pour beaucoup, à la sécurité de l'approvisionnement domestique, avec des capacités d'importation estimées à environ 9 GW, et d'exportation à 13 GW (ENTSO-E, 2014). Leur développement lui a, d'ailleurs, permis d'éviter, pro-parte, la construction de nouvelles centrales pour assurer l'équilibre offre-demande - notamment en période de pointe - et de faciliter l'intégration des énergies renouvelables intermittentes.

La France s'est longtemps appuyée sur le charbon pour satisfaire sa consommation d'énergie. Principale source d'énergie à partir de la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle, le charbon croît ensuite jusqu'à son pic de production en 1958 avant de décliner à compter des années 1980. Parallèlement, la France voit, dans les années 1920, une rapide expansion de la production d'électricité hydraulique grâce aux premiers barrages. Le gaz a également participé en proportion au mix électrique, jusqu'à satisfaire, dans les années 1970, un tiers de sa consommation annuelle. Cependant, le tournant énergétique français s'opère à la suite du premier choc pétrolier de 1973, quand elle décide de miser sur l'énergie nucléaire dont le développement connaîtra ensuite un rythme soutenu²⁵³. Elle compte aujourd'hui 63 GW de capacité nucléaire installée, dont 48 GW ont été raccordés au réseau entre 1979 et 1990.

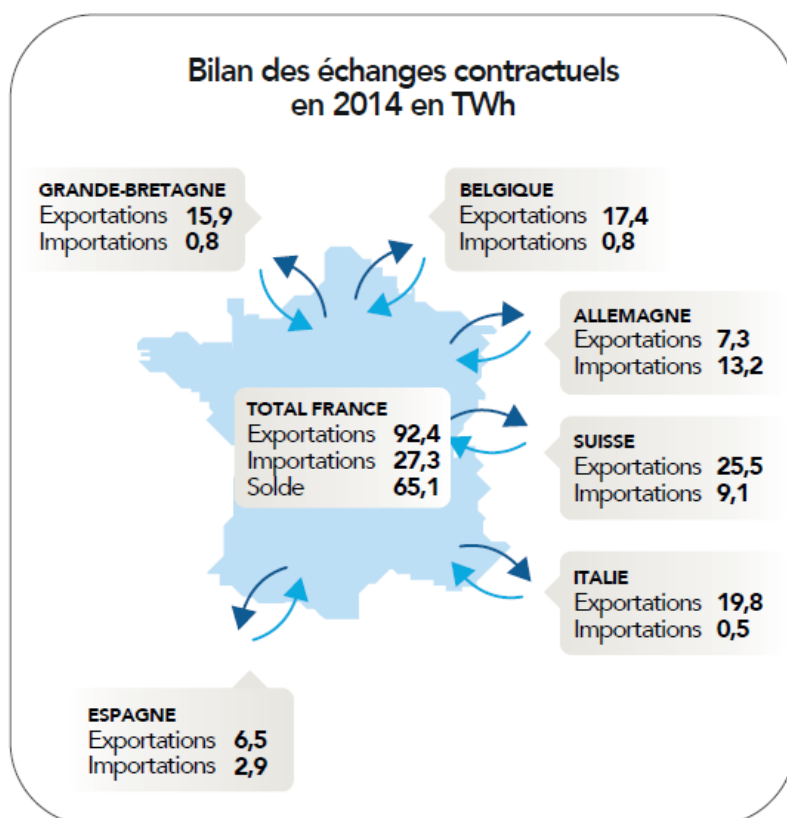
En 2015, la production électrique nette atteint 546 TWh, dont 99% est assurée par seulement trois entreprises : EDF (91%), Engie et E.ON, et, près des trois quarts générés par ses centrales nucléaires (la France se situe au premier rang mondial en termes de part du nucléaire dans le mix électrique). Selon les chiffres de RTE (Réseau de Transmission d'Electricité français) en 2015, la production électrique a atteint 539 TWh, dont 77% de nucléaire, suivi de l'énergie hydraulique (12,6%), du fioul (2,7%) du charbon (1,5%) et du gaz (0,8%). Concernant les nouvelles énergies, l'éolien participe à hauteur de 3,2%, le photovoltaïque de 1,1% et les autres EnR de 0,9%. Bien que la part de l'électricité d'origine renouvelable (hors hydraulique) soit relativement faible par rapport à celle de certains de ses voisins européens (notamment l'Allemagne et l'Espagne), elle est en forte hausse : entre 2011 et 2012, la production d'électricité d'origine photovoltaïque a augmenté de 66,7% et celle de l'électricité produite à partir d'éoliennes, de 23,1%.

De par sa position géographique au cœur de l'Europe et de la structure de son mix électrique, la France doit veiller attentivement à la sécurité de ses réseaux. En 2014, le total des exportations s'élevait à 94,3 TWh contre 27,3 TWh pour les importations.

²⁵² Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

²⁵³ Cf. Chapitre I, section [1.3.1 la sécurité énergétique](#).

Figure 72 : Flux d'électricité en 2014 entre la France et les pays frontaliers



Source : RTE (2014)

L'Agence Internationale de l'Énergie classait, en 2013, la France au premier rang des exportateurs mondiaux d'électricité, et, en 2014, elle est première à l'échelle de l'Europe (Eurostat). Dans la mesure où la production repose, pour l'essentiel, sur les centrales nucléaires, le coût de production marginal de l'électricité est faible en période de base, ce qui favorise les exportations. En revanche, elle ne dispose pas de capacité de pointe suffisante (charbon et gaz) pour faire face aux pics de consommation ; elle est contrainte, lorsqu'ils se produisent, d'importer de l'électricité auprès de ses voisins européens. Parce que les capacités de pointe ne sont utilisées que quelques heures par an afin de satisfaire les pics de consommation, elles ne sont pas rentables et menacent de fermer alors même qu'elles sont essentielles à la sécurité des approvisionnements. RTE, le gestionnaire de transport d'électricité français, prévoit qu'en 2017, la France devra faire appel aux 9 GW de capacité maximum des interconnexions transfrontalières si elle ne veut pas subir un black-out électrique.

Bien que le parc électrique français soit l'un des moins émetteurs de carbone en Europe grâce au nucléaire et à l'hydraulique, la France s'est engagée vigoureusement dans la lutte contre le réchauffement climatique, avec un projet de loi sur la transition énergétique pour une croissance verte adopté par l'Assemblée nationale le 14 octobre 2014. La loi de programmation définit les cinq objectifs suivants :

- réduire les émissions de gaz à effet de serre pour contribuer à l'objectif européen de baisse de 40 % de ces émissions en 2030 (par rapport à la référence 1990) et les diviser par 4 à horizon 2050,
- diminuer de 30 % la consommation d'énergies fossiles à horizon 2030,
- ramener la part du nucléaire à 50 % de la production d'électricité à horizon 2025,
- porter, à horizon 2030, la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation énergétique finale : 40 % pour l'électricité produite, 38 % pour la chaleur consommée et 15 % pour les carburants utilisés,
- diviser par deux la consommation finale d'énergie d'ici à 2050.

Les énergies renouvelables devraient fortement gagner en importance pour limiter la part du nucléaire dans la production électrique. Si leurs capacités ont considérablement augmenté depuis ces dernières années, la France enregistre pourtant un certain retard vis-à-vis de ses voisins, notamment allemands et espagnols. Signalons, également, que l'intégration de ces énergies renouvelables nécessite d'améliorer les réseaux, une question d'autant plus cruciale que la France se trouve sollicitée pour exporter son électricité en période de base et doit en importer auprès de ses voisins dans les périodes de pointe.

2.1.3 Le secteur de l'électricité en Italie, un marché en crise

L'Italie se trouve confronté à un paradoxe à l'origine d'une crise sans précédent. Malgré la présence de surcapacités de production, elle est le plus grand importateur d'électricité d'Europe : en 2014, les importations se sont élevées à 43,7 TWh²⁵⁴ soit 14 % de sa consommation totale. En effet, d'un côté, elle dispose d'un parc de production d'électricité pour l'essentiel appuyé sur le gaz, dont le coût est aujourd'hui peu compétitif et, de l'autre, elle a significativement soutenu le développement de l'électricité renouvelable, dont l'introduction dans le réseau est prioritaire. Dans ces conditions, il coûte aujourd'hui moins cher à l'Italie d'importer de l'électricité que de la produire à partir des centrales installées sur son territoire.

Selon l'opérateur de transmission d'électricité italien Terna, la production électrique en Italie se répartit en 2015 de la manière suivante : hydroélectrique (16,5%), thermoélectrique (67%), géothermique (2%), éolien (5,5%) et photovoltaïque (9%). Les données d'Eurostat soulignent la hausse record du coût de l'électricité pour les consommateurs italiens en 2014, bien supérieure à la moyenne européenne, et un niveau de consommation relativement bas comparativement à ses voisins européens. La proportion significative de gaz, le renoncement au nucléaire et les politiques de soutien aux EnR permettent d'expliquer cette situation.

²⁵⁴ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

Entre 2007 et 2013, la consommation d'électricité d'origine éolienne a crû au rythme de 23% par an et celle d'origine photovoltaïque au rythme de 174%. Pour soutenir cette croissance, des tarifs de rachat particulièrement avantageux ont été proposés. Dans la mesure où le coût de ces dispositifs de soutien est reporté sur les consommateurs, le prix de l'électricité pour les utilisateurs finaux, que ce soit les ménages ou les industriels, ont augmenté pour atteindre des niveaux parmi les plus élevés d'Europe²⁵⁵ provoquant une baisse de la demande en électricité.

Le mix électrique de l'Italie est fortement dépendant des énergies fossiles et du gaz en particulier. Le coût marginal de production de l'électricité à partir des centrales à gaz est, au regard des autres énergies disponibles (en particulier charbon et nucléaire), particulièrement élevé. Dans ce contexte de baisse de la demande d'électricité et de diminution du prix du charbon, il lui est donc moins onéreux d'importer de l'électricité, principalement auprès de la France²⁵⁶. De plus, alors que pour limiter la dépendance aux énergies fossiles, le programme nucléaire²⁵⁷ mis en place par le gouvernement de Silvio Berlusconi prévoyait la construction de quatre EPR, il a été rejeté en juin 2011 par un référendum populaire ; un vote qui a bouleversé la stratégie énergétique du pays à long terme, puisque Rome prévoyait de porter la part du nucléaire à 25% dans sa production d'électricité d'ici 2030.

Tous ces éléments conduisent à une crise sans précédent du marché de l'électricité en Italie, caractérisée par une surproduction des capacités thermiques (la production issue des centrales thermiques a diminué de 6,3% entre 2011 et 2012), résultant principalement de la baisse de la demande et du déploiement rapide des énergies renouvelables. Une surproduction qui a provoqué, par ricochet, une baisse importante des prix de gros de l'électricité, au point que de nombreuses unités de production ne soient désormais plus rentables (CGSP, 2014) ; et que dans le même temps, l'Italie importe de l'électricité, principalement d'origine nucléaire, (13% de l'électricité consommée en 2014).

La politique de transition énergétique italienne est formulée dans le rapport "Stratégie énergétique nationale" (SEN), document approuvé par le gouvernement italien en mars 2013 qui propose un corpus de mesures destinées à réduire les coûts de l'énergie et à dépasser les objectifs environnementaux fixés par l'UE. Le pays entend réduire sa dépendance aux pays dont elle importe pétrole, gaz et électricité : car, aujourd'hui, 80 % des besoins italiens en énergie sont comblés par les énergies fossiles.

2.1.4 L'Espagne, leader dans l'éolien

Le mix électrique espagnol a vu se succéder une série d'énergies « dominantes ». D'abord l'hydroélectricité pendant la première moitié du siècle, puis le pétrole, et enfin le nucléaire, pour répondre à l'augmentation rapide de la demande qui a suivi la fin du régime franquiste, jusqu'à l'entrée en vigueur du moratoire sur l'énergie nucléaire en 1984, qui a marqué le début

²⁵⁵ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique.](#)

²⁵⁶ Avec une part de 14% d'électricité importée, l'Italie est le plus grand importateur d'électricité en Europe.

²⁵⁷ A la suite de la catastrophe de Tchernobyl en 1987, l'Italie était sortie du nucléaire.

de l'avènement du charbon. Depuis les années 2000, le mix électrique espagnol est marqué par une forte croissance de la filière gazière et le recours progressif aux énergies renouvelables, principalement éolienne. L'écart entre le coût de production élevé des EnR fortement subventionnées et le prix de l'électricité payée par les consommateurs aurait créé, selon les informations du site « l'énergie en questions »²⁵⁸, une dette de l'ordre de 26 Md€.

Selon les chiffres de l'opérateur de transmission d'électricité espagnol Red Electrica Espana, la répartition des capacités de production d'électricité en 2015 est la suivante : hydraulique (10%), nucléaire (23%), charbon (21%), cycle combiné (10%), éolien (19%), photovoltaïque (5%), thermique renouvelable (2%), cogénération (10%).

Alors qu'elle a significativement investi dans l'électricité d'origine renouvelable au point de devenir l'un des leaders européens dans l'éolien et le photovoltaïque, les efforts de l'Espagne sont, depuis 2013, nettement moins soutenus. A partir des années 2000, les EnR se sont développées de manière rapide, en raison d'atouts naturels incontestables, mais aussi et surtout d'un important subventionnement public : l'Espagne est le deuxième producteur d'électricité éolienne en Europe avec 15,9 % du total européen contre 29 % pour l'Allemagne, qui lui a ravi la première place en 2014. En 2015, la production espagnole représente 16,3 % de la production européenne totale contre 31,7 % pour l'Allemagne. Avec un taux de croissance moyen de 24,9% sur la période 2000-2010, l'éolien est devenu la première source d'électricité en Espagne qui possède, avec 23 GW de puissance installée, le quatrième parc éolien mondial en 2014. Toutefois, cette croissance connaît, désormais, un net ralentissement suite à la crise économique, la mise en place d'un cadre législatif réduisant les aides aux EnR et le renforcement des procédures administratives nécessaires pour établir un parc éolien. Les producteurs ont même été obligés d'accepter une baisse rétroactive des aides qui leur avaient été accordées initialement. Tout comme l'éolien, la croissance du solaire photovoltaïque a été considérablement freinée par une modification du régime d'autorisation, le gouvernement ayant mis fin aux mesures incitatives à l'origine d'« une course à l'installation ».

L'intégration de nouvelles capacités renouvelables contraint l'Espagne à exporter son excédent d'électricité verte vers le reste de l'Europe. Or, actuellement, la péninsule ibérique possède l'un des taux d'interconnexion les plus bas de l'Union européenne : elle ne peut échanger qu'une faible quantité d'électricité, ce qui limite sa capacité à « aider ou être aidée » en cas de « défaillance » du système électrique. En 2015, une nouvelle liaison souterraine à très haute tension a donc été mise en service entre la France et l'Espagne afin de doubler le niveau d'interconnexion entre les deux pays (de 1,4 GW à 2,8 GW). Une ligne qui doit renforcer la sécurité d'approvisionnement électrique des deux, permettre d'intégrer une quantité supérieure d'électricité d'origine renouvelable et d'éviter l'émission d'un million de tonnes de CO₂ par an. En période de creux de production renouvelable, l'Espagne pourra également plus facilement importer de France une électricité au coût compétitif.

En 2010, le Conseil des ministres espagnol a approuvé la Planification Energétique Indicative (PEI) qui dessine l'horizon énergétique pour 2020, ainsi que le Plan Energies Renouvelables (PER) qui propose des mesures visant à porter à, au moins, 20% de la consommation

²⁵⁸ <https://www.lenergieenquestions.fr/espagne-nouvelle-baisse-des-aides-aux-energies-renouvelables/>

énergétique finale, la production en provenance de sources renouvelables. Le PEI estime qu'en 2020, la consommation énergétique de l'Espagne devrait être légèrement supérieure à la consommation actuelle et que le poids de l'électricité, du gaz et des renouvelables devrait augmenter, et celui du pétrole, diminuer. Le coût des propositions du PER est estimé à 24,7 Md€ tandis que les bénéfices directs et quantifiables sont évalués à 29 Md€ d'euros. Bien que 78% des objectifs de consommation d'énergies renouvelables du PER en réfèrent à l'utilisation de technologies mûres, le document inclut aussi une forte composante en R&D en matière de biocarburants de nouvelles générations, de nouveaux matériaux, de systèmes de stockage de l'énergie, de nouveaux systèmes de perforation pour la géothermie, de convertisseurs d'énergie des vagues ou encore d'éoliennes marines. La création de l'Alliance pour la Recherche et l'Innovation Énergétique sera un instrument capital pour répondre aux défis de la R&D énergétique dans un cadre de collaboration stratégique entre les secteurs publics et privés afin de permettre une meilleure utilisation des énergies renouvelables.

Comme indiqué en introduction, le soutien massif aux énergies renouvelables aurait engendré un déficit de 26 Md€, et, ce, malgré la hausse du prix de l'électricité facturée aux particuliers (+80% depuis 2006). Pour y faire face, le gouvernement espagnol est contraint de réduire encore les subventions et de poursuivre l'augmentation progressive du coût de l'électricité. En décembre 2013, une nouvelle loi sur l'énergie a été promulguée pour mettre fin au déficit récurrent du système électrique espagnol qui menace la stabilité économique et financière du secteur et l'empêche de se développer dans un cadre réglementaire stable.

Si le mix électrique espagnol est relativement équilibré et plutôt bas carbone par rapport à ses voisins européens, la montée en puissance de l'éolien est susceptible de compliquer la stabilité de la production électrique sur le court terme, et davantage encore, à horizon 2030. Le renforcement de l'interconnexion électrique franco-espagnole devrait remédier pour partie à ces risques d'instabilité et de fragilité dans la sécurité des approvisionnements, en permettant à l'Espagne d'accéder à davantage d'électricité française et faciliter l'intégration des énergies renouvelables ; mais la question de l'amélioration de ses réseaux demeure un enjeu majeur pour l'Espagne.

2.1.5 Conclusion

L'analyse des enjeux énergétiques à l'échelle des pays met en évidence un certain nombre de similitudes. Pour chacun des pays étudiés, les énergies renouvelables sont au cœur de la stratégie de lutte contre le réchauffement climatique, bien que le niveau du soutien à leur endroit diffère d'un pays à l'autre. Ils partagent également la nécessité de faire évoluer leurs réseaux afin d'optimiser la demande, d'intégrer les énergies renouvelables et de faciliter les échanges avec leurs partenaires européens. Il est, toutefois, utile de rappeler que certains pays sont importateurs d'électricité (Italie) et d'autres exportateurs (France, Allemagne, et dans une moindre mesure, Espagne).

La France est caractérisée par sa faible intensité carbone due à la prépondérance du nucléaire dans sa production d'électricité et, dans une moindre mesure, de l'hydraulique - réalité qui l'a conduite à moins soutenir le développement des énergies renouvelables que ses voisins. La loi pour la transition énergétique, votée en 2014, est donc amenée à bouleverser les équilibres établis en imposant une substitution progressive du nucléaire au bénéfice des énergies renouvelables. Par ailleurs, en raison de son coût de production de l'électricité particulièrement compétitif, elle n'est pas exposée à la crise des capacités qui menace ses voisins, et, pour cette même raison, (cumulée à sa position géographique centrale), elle représente un partenaire commercial de premier rang pour ces derniers. Retenons, enfin, que la production d'électricité est concentrée autour d'un prestataire, EDF qui assure 95% de la production. Suivant la même logique, les opérations de distribution et de transmission ont été chacune confiées à un unique opérateur : RTE, filiale à 100% d'EDF, pour la transmission, et ERDF, filiale à 100% d'EDF qui assure 95% de la distribution d'électricité en métropole, (les 5% restants étant prises en charge par des entreprises locales).

L'Espagne a vigoureusement investi le champ des énergies renouvelables, en particulier l'éolien, si bien que ce domaine représente aujourd'hui la plus grande part des capacités installées. Mais ce soutien s'est réalisé au prix d'un endettement massif. De plus, l'intégration d'énergies renouvelables en grande quantité oblige l'Espagne à exporter son excédent d'électricité verte vers le reste de l'Europe, alors même qu'elle possède l'un des taux d'interconnexion les plus bas de l'Union européenne. Trois principales entreprises concentrent plus de 80% des capacités installées: Iberdrola (environ 33%), Endesa, rachetée en 2007 par Enel (30%) et Union Fenosa, acquise par Gas natural en 2009 (20%). Red Electrica assure la quasi-totalité de la transmission d'électricité tandis que la distribution d'électricité est assurée par les filiales des trois principaux producteurs.

La politique énergétique de l'Allemagne est caractérisée, depuis quelques années, par un soutien massif aux énergies renouvelables, avec l'objectif ambitieux de porter leur part dans la consommation finale à 35 % d'ici 2020 et à 80 % à horizon 2050. Mais également par la décision de sortir complètement du nucléaire d'ici 2022 : une politique qui contraint l'Allemagne à recourir massivement au charbon, le temps que les énergies renouvelables se substituent au nucléaire. De plus, si l'injection massive des énergies renouvelables dans le réseau a conduit l'Allemagne à exporter de l'électricité, de nombreuses demandes de

fermetures de centrales thermiques ont été enregistrées auprès du régulateur, ce qui présente un « danger » potentiel dans la mesure où ces centrales sont nécessaires pour combler l'intermittence des énergies renouvelables en période de pointe. Notons, en outre, que les marchés de la distribution et de la production sont moins concentrés que dans les autres pays puisque quatre principales compagnies interviennent dans la production d'électricité (E.ON, RWE et EnBW et le suédois Vattenfall) et 170 dans la distribution.

L'Italie est le pays le plus sensiblement touché par la crise du secteur électrique des pays étudiés. Alors qu'elle a rejeté par referendum l'installation de capacités nucléaires, elle détient un parc de production d'électricité peu compétitif, caractérisé par un recours significatif au gaz. Et parce qu'elle a fortement encouragé l'introduction des énergies renouvelables, elle subit aujourd'hui une surcapacité de production, mais est, paradoxalement, contrainte d'importer de l'électricité, en raison de son coût et dans des proportions relativement élevées (13 % de sa consommation).

On assiste, donc, à des modèles de substitution différents, où les énergies renouvelables, en fonction des mix énergétiques des pays, remplacent soit le charbon soit le nucléaire. Un tableau d'ensemble qui nous aide à mieux cerner les enjeux des stratégies d'innovation propres à chacun des électriciens du périmètre (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE), qu'il s'agit désormais d'étudier au cas par cas, préalablement contextualisés, par leur histoire, la composition de leur portefeuille d'activité, leur mix énergétique, leur présence à l'international et leurs objectifs en matière de lutte contre le réchauffement climatique.

2.2 ELECTRICITE DE FRANCE

2.2.1 Les enjeux de la transition énergétique

EDF est née en 1946 dans le cadre de la loi de nationalisation des 1450 entreprises françaises de production, de transport et de distribution d'électricité²⁵⁹. C'est le fournisseur historique d'électricité en France, propriétaire de la plupart des capacités installées sur le territoire. Il est aussi le premier producteur à l'échelle européenne et mondiale – où il sert plus de 40 millions de clients. En 2014, la part des capacités électriques d'EDF, installées en Europe, représentent 89%, dont 72% pour la France (EDF, 2015). Groupe international solidement ancré en Europe, EDF est aussi engagé dans les zones à forte croissance telles que l'Amérique (Brésil, Canada, Mexique, Etats-Unis) et l'Asie (Vietnam, Chine, Turquie, Russie, Inde...).

EDF fait figure d'exception parmi les électriciens étudiés.²⁶⁰ Il est le seul présent sur l'ensemble de la filière électricité : production, transport (RTE est une filière à 100% d'EDF) et distribution (il dispose de la totalité du capital d'ERDF). La participation de l'Etat à son capital est la plus importante de tous (84,9% au 31 décembre 2015). Il consacre la proportion de son chiffre d'affaires la plus élevée aux activités de R&D : sur la période 2007-2013, l'intensité R&D d'EDF atteint en moyenne 0,7%, alors que, sur la même période, la moyenne des électriciens s'élève à 0,25%. Il est détenteur du coût de production de l'électricité le plus compétitif. Et enfin, c'est l'électricien à l'intensité carbone (150 gCO₂/KWh)²⁶¹ la plus faible ; l'enjeu de la réduction des émissions de CO₂ pour EDF est donc moins « crucial » que pour les autres électriciens.

En 2015, les capacités de production mix énergétique d'EDF se répartissent comme suit : le nucléaire représente 77%, suivi, très loin derrière, du thermique fossile hors gaz (8%) et du cycle combiné gaz et la cogénération (6%). Concernant les énergies renouvelables, 7% de l'électricité provient de l'énergie hydraulique, et 2% du solaire et de l'éolien ; une répartition qui lui permet de produire 85,1% de son électricité sans émettre de CO₂.

Sur le plan européen, EDF a été particulièrement actif dans la consolidation du secteur électrique en faisant l'acquisition de British Energy au Royaume-Uni (rebaptisé EDF Energy), et de 51 % du capital de SPE en Belgique. En Autriche, il s'est renforcé dans le capital d'ESTAG, et a racheté, en Italie, Edison.

²⁵⁹ Cf. Chapitre I, section [1.3.2 La régulation de la concurrence](#).

²⁶⁰ Les éléments relatifs à la participation de l'Etat, à l'intensité carbone et à l'intensité R&D sont présentés dans le Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#). La comparaison du prix de l'électricité en France avec celui des autres pays européens est présentée dans le Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

²⁶¹ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

EDF évolue dans un contexte de politique nationale marquée par la volonté de l'État de réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité française à hauteur de 50% avant 2025 et d'organiser une parité d'investissements entre le nucléaire et les énergies renouvelables²⁶². Mais, avec 73 réacteurs en exploitation en France et au Royaume-Uni détenus en propre et 5 aux États-Unis via Constellation Energy Nuclear Group (CENG), EDF est le premier exploitant nucléaire mondial, et, depuis quelques années, engagé dans le domaine de la fission nucléaire de IV^{ème} génération avec l'EPR de Flamanville. Pour la première fois développée en France, cette technologie offre des améliorations sur le plan de la sûreté, de l'environnement et des performances économiques d'envergure par rapport aux réacteurs de III^{ème} génération et constitue donc une étape essentielle sur la voie du renouvellement de son parc. Car, au regard du rôle que le nucléaire est amené à jouer dans la transition énergétique à l'échelle mondiale, EDF a pour ambition de poursuivre son développement international en conservant sa position de leader. Cependant, dans un contexte de concurrence de plus en plus rude²⁶³ et de défiance suite à la catastrophe de Fukushima, EDF éprouve, aujourd'hui, des difficultés à signer de nouveaux contrats. Notons, en outre, que le vieillissement du parc nucléaire national nuit à la rentabilité et dégrade ses comptes. En 2014, les 58 réacteurs du parc nucléaire français n'ont atteint un taux de disponibilité que de 75%, soit un résultat très inférieur aux ambitions fixées, et qui l'ont obligé à faire appel à des centrales au coût de production supérieur à celui proposé par le nucléaire.

Suite à la loi sur la transition énergétique qui programme une diminution importante du nucléaire, il est prévu qu'EDF plafonne la puissance nucléaire installée, puis ferme progressivement certaines de ses centrales (à commencer par celle de Fessenheim). Toutefois, la baisse du nucléaire dans le mix énergétique d'EDF et, par extension de la France, s'annonce d'autant plus complexe qu'aujourd'hui, seuls l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et l'opérateur EDF semblent pouvoir décider de l'arrêt d'une centrale : pour des raisons de sécurité en ce qui concerne l'ASN et pour des motifs économiques du côté de l'exploitant EDF. De plus, la fermeture des centrales nucléaires dépend du niveau de la demande en électricité. Si celle-ci venait à augmenter par des transferts d'usage (véhicule électriques, chauffage et climatisation), Jean-Bernard Levy, PDG d'EDF, déclarait en février 2016 qu'il n'était pas prévu de fermer plus de deux réacteurs dans les 10 ans à venir²⁶⁴. Cependant, si la demande restait stable, il faudrait, alors, mettre à l'arrêt une vingtaine de réacteurs.

EDF est présent dans les énergies renouvelables, depuis longtemps à travers l'énergie hydraulique²⁶⁵ et depuis le début des années 2000 dans le domaine de l'éolien et du photovoltaïque, pour lesquels sa part de marché atteint seulement 6% en France. En dépit de cette faible part, elle se classe, tout de même, au deuxième rang des producteurs d'énergie renouvelables (hors hydraulique) français. L'arrivée d'EDF dans le domaine des énergies

²⁶² Cf. Chapitre V, section [2.1.2 La France : un modèle de bouquet énergétique décarboné et compétitif](#).

²⁶³ On pense notamment au contrat perdu aux Emirats Arabes Unis où un consortium coréen a été sélectionné pour construire quatre centrales nucléaires.

²⁶⁴ <http://www.europe1.fr/economie/edf-ne-prevoit-pas-de-fermer-plus-de-deux-reacteurs-nucleaires-en-france-2669821>

²⁶⁵ Le parc hydraulique d'EDF représente en France 20 000 MW de puissance installée faisant d'EDF le premier producteur d'énergie hydraulique de l'Union européenne.

alternatives a été réalisée à travers la montée progressive au capital de SIFF²⁶⁶, rebaptisé EDF Energies Nouvelles (EDF EN) en 2004. En 2011, EDF rachète la totalité des actions d'EDF EN et la retire de la côte. Les puissances éoliennes installées sont de 613 MW et celles du solaire photovoltaïque atteignent 150 MW. EDF EN, présent dans 17 pays, s'est engagée dans l'éolien en mer en 2008 avec une montée en puissance depuis 2012, impulsée par l'appel d'offres lancé pour développer des éoliennes sur les sites de Saint-Nazaire, de Fécamp et de Courseulles-sur-Mer. La filière photovoltaïque représente le deuxième axe de développement d'EDF EN. Aujourd'hui, 85 % des moyens de production solaire et éolien du groupe sont situés hors du territoire, principalement aux Etats-Unis, Canada, Mexique, Israël, Pays-Bas, Pologne, Vietnam, Brésil ou Chine. Notons que la diversité de la présence internationale d'EDF est davantage due à son développement sur les nouvelles énergies qu'aux centrales fossiles ou nucléaires.

En matière de renouvelables, EDF vise, à horizon 2025, que la part de ses capacités de production dans les énergies vertes - en incluant l'hydraulique - atteigne 25 %, avec une part des autres énergies renouvelables, principalement l'éolien, à 8 % de son mix énergétique. Pour cela, EDF investit considérablement pour augmenter la rentabilité des énergies renouvelables et favoriser l'innovation technologique. Outre le solaire et l'éolien, les énergies marines constituent un axe de développement important pour le groupe, présent dans ce domaine depuis 1962 grâce à l'usine marémotrice de La Rance. Dans la mesure où la France dispose du deuxième domaine maritime mondial (dont la superficie atteint 11 millions de kilomètres carrés), les énergies des mers représentent un gisement significatif, encore peu exploité à l'échelle industrielle.

Dans ce contexte, l'énergéticien a décidé de renforcer, à horizon 2020, ses positions dans certains marchés considérés comme prioritaires. Tout d'abord, à l'échelle domestique où il entend améliorer ses performances opérationnelles, au Royaume-Uni où il cherche à renforcer ses positions dans le nucléaire et les EnR, mais aussi en Italie grâce à sa filiale Edison, pour développer des centrales thermiques et des barrages hydrauliques. EDF souhaite également apporter son savoir-faire d'opérateur intégré dans les marchés en croissance des pays en développement. Il prévoit aussi d'investir dans l'innovation en matière de photovoltaïque de nouvelle génération, de solaire à concentration, d'éolien off-shore et d'hydrolienne, et dans les technologies de captage et de stockage du CO₂, bien que sa production en France soit principalement assurée par l'énergie nucléaire. Enfin, pour identifier, à des fins d'investissement, les innovations bas carbone au plus fort potentiel, EDF a lancé en 2011 le fonds Electranova Capital qui soutient les jeunes entreprises actives dans les énergies renouvelables, le stockage de l'énergie et les réseaux électriques intelligents, l'efficacité énergétique, et, plus globalement, les technologies environnementales.

²⁶⁶ Société International d'Investissement Financiers, créée en 1990 par Pâris Mouratoglou qui intervenait initialement en tant qu'opérateur de centrales thermiques avant de se spécialiser à partir de 1999 dans le domaine des énergies renouvelables.

2.2.2 Stratégie d'innovation

EDF exporte une grande partie de son électricité aux pays limitrophes et évolue sur un marché domestique moins marqué par la crise du secteur électrique que ses voisins européens²⁶⁷ même s'il se trouve aujourd'hui dans une situation difficile²⁶⁸. Appuyé principalement sur le nucléaire, dont il est le leader mondial, il bénéficie de coûts de production particulièrement compétitifs et demeure très faiblement émetteur en carbone, en valeur absolue, par rapport aux autres électriciens considérés.

Cependant, dans la mesure où la France a décidé d'augmenter la part des énergies renouvelables dans sa production électrique, EDF devra substituer une partie de ses capacités thermiques au bénéfice des énergies renouvelables. Dans ces conditions, il est intéressant d'apprécier dans quelle mesure la stratégie d'innovation menée entre 2007 et 2013 a anticipé cette nouvelle donne en s'orientant vers les technologies de substitution ou si, au contraire, elle est restée profondément ancrée dans l'addition technologique (dont le nucléaire fait partie).

Alors que la stratégie technologique d'EDF dans les énergies renouvelables s'est appuyée sur la prise de participation successive, puis le rachat total de l'entreprise SIIF en 2011 (rebaptisée EDF Energies Nouvelles en 2004), les modalités d'acquisition des nouvelles connaissances dans des domaines hors de son savoir-faire historique soulèvent plusieurs questions. Dans la mesure où EDF consacre en moyenne 0,7% de son chiffre d'affaires aux activités de Recherche et Développement, soit le ratio le plus élevé des électriciens considérés, on peut s'interroger sur l'orientation de son processus de génération d'innovation, en interne ou dans une démarche de co-construction avec son écosystème. Et au vu de son coût de l'électricité particulièrement compétitif - qui en fait un partenaire de premier rang de plusieurs électriciens européens - il sera également intéressant d'apprécier dans quelle mesure il est engagé dans une démarche de coopération.

2.2.2.1 Analyse de la stratégie technologique

EDF est engagé dans 83 projets du 7^{ème} PCRD dont 69 concernent les technologies étudiées, pour un coût total cumulé de 641 M€ avec un financement de la Commission européenne de 365 M€. Entre 2007 et 2013, 455 brevets ont été déposés par EDF dont 42% concernent des brevets verts au sens de l'Inventaire vert de l'OMPI, dont 3% relèvent de technologies non

²⁶⁷ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis à vis de la transition énergétique](#).

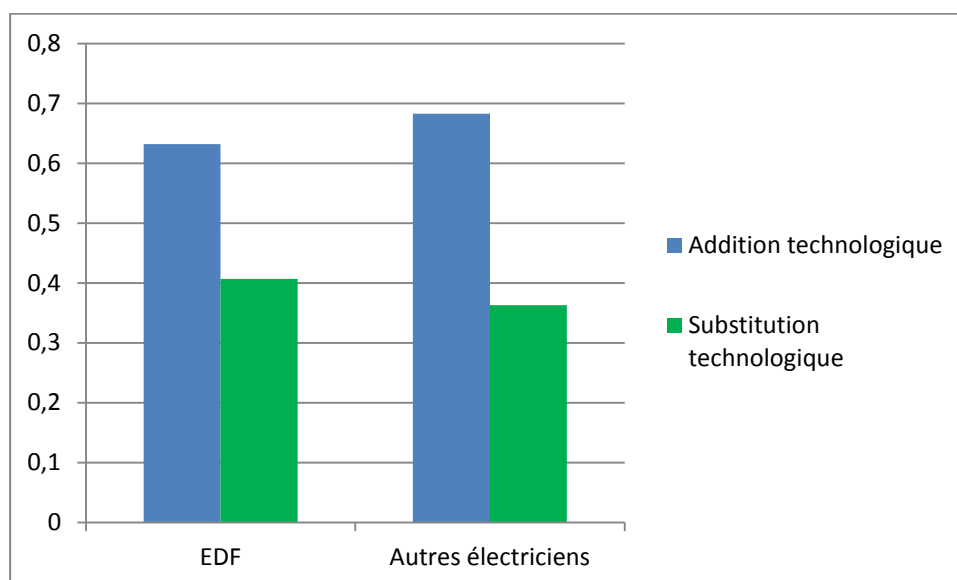
²⁶⁸ En février 2016, son cours de bourse est passé, pour la première fois, en dessous du seuil de 10€ alors qu'il atteignait lors de son introduction en Bourse 32€. La défiance des investisseurs s'explique par « une faible visibilité sur le montant total des coûts et des investissements à supporter dans les années à venir (notamment pour le rachat de la branche « réacteur » d'Areva), dans un contexte de baisse des prix de gros de l'électricité » comme le souligne Aurel BGC <http://www.challenges.fr/finance-et-marche/marches-financiers/20160223.CHA5417/le-titre-edf-sous-la-barre-des-10-euros-pour-la-1ere-fois.html>

énergétiques²⁶⁹ et 2% des brevets verts énergétiques non inclus dans le périmètre d'étude. Au total, 156 brevets concernent les cinq domaines technologiques retenus (CCS, énergie renouvelables, fission nucléaire, hydrogène et smart grids).

Premier constat, EDF se classe en tête à la fois en nombre de brevets déposés et de projets collaboratifs parmi les électriciens étudiés – ce qui est cohérent avec les moyens, largement supérieurs aux autres électriciens, qu'elle mobilise²⁷⁰ ; et couvre, contrairement à la plupart, l'ensemble des technologies étudiées, signe d'une stratégie diversifiée.

On constate également qu'EDF oriente sa stratégie technologique en priorité vers les technologies d'addition, bien que son engagement dans les technologies de substitution reste supérieur à celui des autres électriciens.

Figure 73 : Comparaison de l'intensité²⁷¹ de l'engagement d'EDF dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui des autres électriciens



Source : auteur

Cette orientation s'explique par la composition de son mix électrique qui repose principalement sur le nucléaire et très peu sur les énergies fossiles ; il est, par conséquent, moins prioritaire pour EDF de limiter les émissions de CO₂. Mais si cette stratégie en œuvre entre 2007 et 2013 fait alors sens, elle devra sans doute être réajustée suite au vote en 2014 de la loi sur la transition énergétique, qui, en fixant à 50% de la part du nucléaire dans la production d'électricité à horizon 2025 (alors qu'elle s'élevait à 75% en 2015), va le

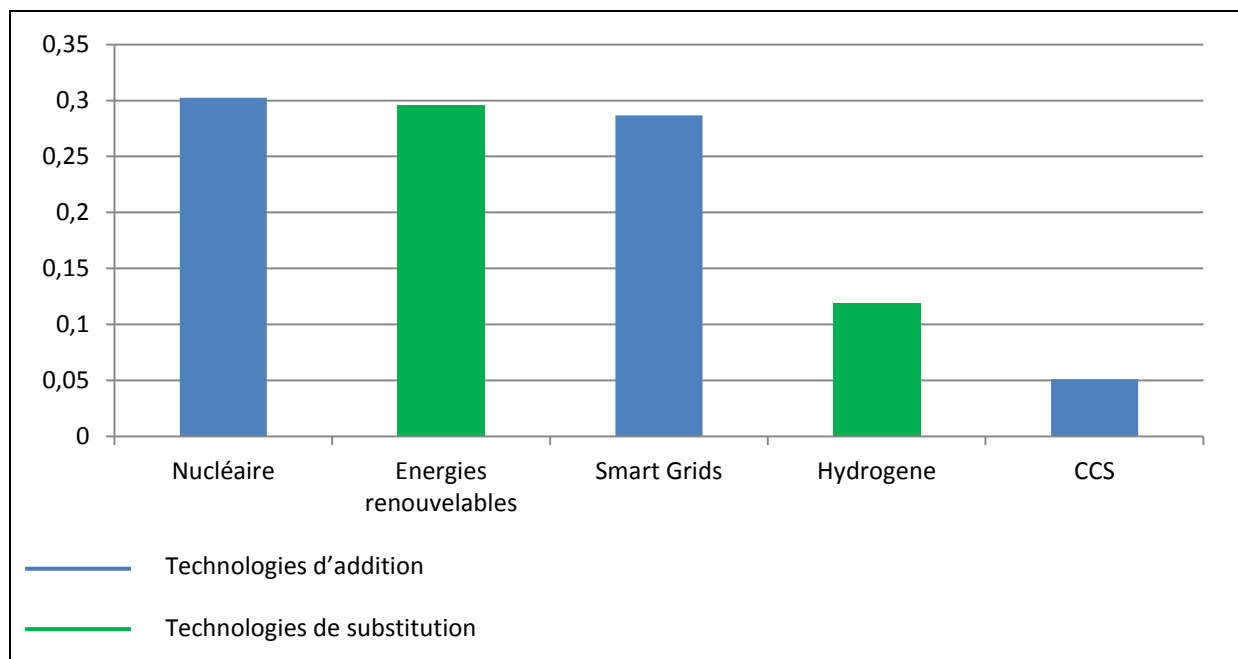
²⁶⁹ Les technologies vertes non énergétiques concernent la diminution des impacts sur l'environnement telles que la gestion de l'eau ou des sols.

²⁷⁰ Que l'on raisonne en valeur absolue ou qu'on les rapporte au chiffre d'affaires, Les budgets d'EDF consacrés à la R&D sont les plus élevés des électriciens considérés, cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

²⁷¹ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

contraindre, en tant qu'unique opérateur des centrales nucléaires françaises, à se repositionner plus largement sur les technologies de substitution.

Figure 74 : Intensité²⁷² de l'engagement d'EDF à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

On remarque que les trois principaux domaines explorés par EDF sont les suivants : la fission nucléaire, les énergies renouvelables et les smart grids. Contrairement à ce qu'observé à l'échelle du secteur²⁷³, et qui se comprenait de par leur nature systémique, ces deux derniers ne se classent pas, ici, en tête des domaines explorés.

EDF est particulièrement présent sur le secteur de la fission nucléaire. Avec 29 projets menés, dont trois en tant que coordinateur, et 42 brevets déposés, EDF est l'électricien le plus engagé sur cette filière. En sa qualité de leader mondial en ce domaine, il souhaite maintenir son avantage compétitif, ce qui nécessite de maîtriser les techniques de pointe (performance des réacteurs et sécurité).

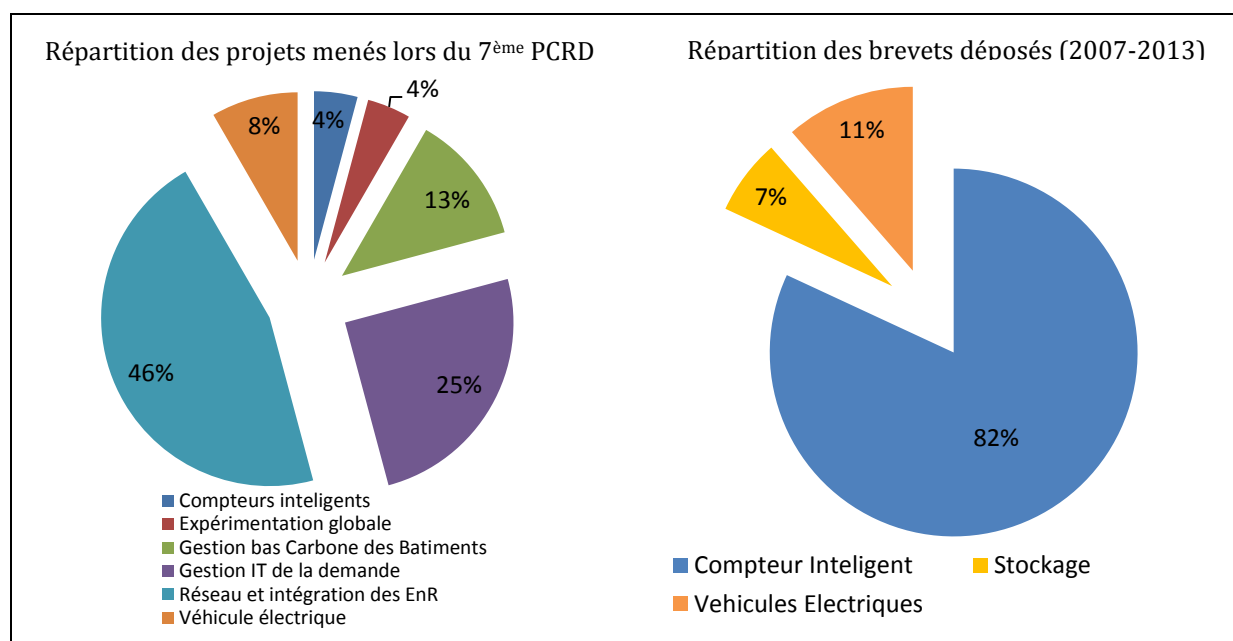
Concernant les smart grids, la répartition des 32 brevets et des 24 projets (Figure 75) témoigne de sa présence sur l'ensemble des segments. Une observation qui confirme la stratégie diversifiée du groupe et est cohérente avec le fait que, contrairement aux autres électriciens, elle intervient sur l'ensemble de la filière électricité, de la production à la distribution en passant par la transmission. On notera la première place, en nombre de projets, des segments des réseaux et intégration des EnR et de la gestion IT de la demande : sa position au carrefour de l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, l'Italie et la Suisse, assorti du

²⁷² L'intensité est mesurée à travers un score tenant compte de la part des brevets et des projets d'EDF dans chacune des technologies par rapport aux nombre total de brevets déposés et au total nombre de projets conduits par l'ensemble des électriciens étudiés. Cf. Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

²⁷³ Cf. Chapitre IV, section [1.Comparaison des domaines technologiques](#).

coût de production particulièrement faible de l'électricité nucléaire, en font un partenaire de premier rang pour l'ensemble des pays limitrophes. Concernant la gestion IT de la demande, sa forte implication tendrait à suggérer qu'EDF entend conserver une position stratégique face à l'arrivée de nouveaux entrants sur la chaîne de valeur électrique. Dans le cas des brevets, enfin, EDF se positionne prioritairement sur le domaine des compteurs intelligents, preuve de sa motivation à devenir un acteur de poids dans les « villes connectées ».

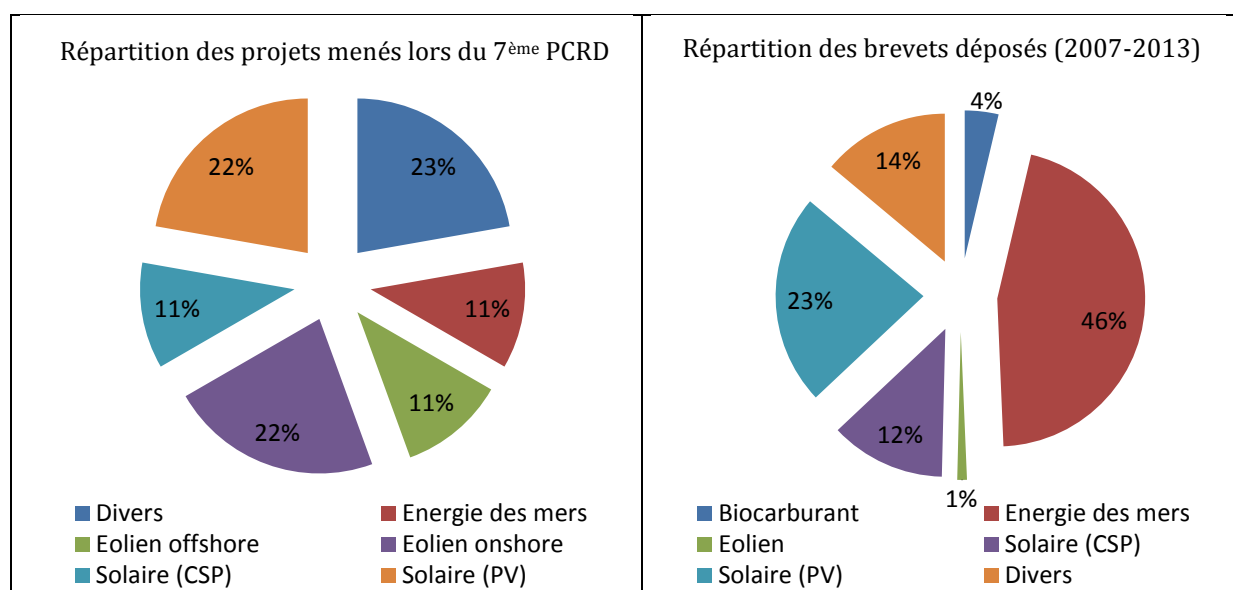
Figure 75 : Répartition des brevets et des projets d'EDF dans les smart grids



Source : auteur à partir de Cordis et Patstat

Avec une participation à 9 projets et 62 brevets déposés (probablement du fait de sa stratégie d'internationalisation), EDF est l'électricien le plus engagé dans le domaine des énergies renouvelables. L'analyse spécifique de ce secteur confirme sa volonté d'explorer la plus large variété possible de moyens de production alternatifs. Alors que sur les projets, c'est le solaire (PV et CSP cumulés) qui occupe la première place (avec une part proche de 50%), concernant les brevets, la pôle-position est occupée par les énergies des mers. Un intérêt pour ce domaine qui s'explique par l'énorme potentiel électrique encore peu exploité que représente l'immensité du domaine maritime français (deuxième mondial avec 11 millions de kilomètres carrés) et témoigne du rôle majeur qu'entend jouer EDF dans son développement : elle a, d'ailleurs, inauguré dès 2004 le site de Paimpol-Bréhat afin de tester la production d'électricité à partir d'énergie hydrolienne et retenu en 2008 la technologie développée par OpenHydro pour mener les expérimentations. En revanche, on notera que l'éolien représente une part mineure des portefeuilles de brevets et de projets, alors même qu'il constitue un axe stratégique de développement du groupe. La prééminence du solaire sur ce dernier pouvant s'interpréter comme le signe d'une ambition de se développer dans des pays plutôt ensoleillés.

Figure 76 : Répartition des brevets et des projets d'EDF dans les énergies renouvelables²⁷⁴



Source : auteur à partir des bases Cordis et Patstat

Relevons, enfin, que le CCS, en toute logique, est le domaine sur lequel EDF est le moins engagé (seulement 5 projets et aucun brevet) ; il est, en effet, l'électricien le moins dépendant des centrales thermiques. Mais, paradoxalement, il est le plus engagé dans les projets relatifs à l'hydrogène (8 projets et 19 brevets), alors même que l'activité du gaz est loin de peser aussi lourd, dans son chiffre d'affaires, que pour d'autres acteurs.

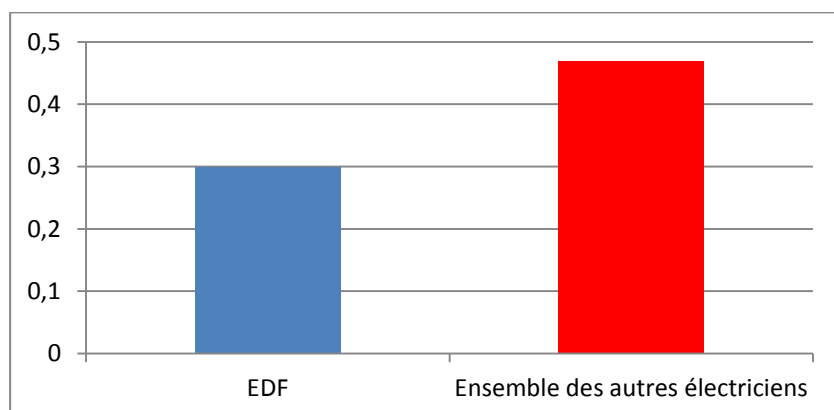
2.2.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des connaissances

Le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances d'EDF est particulièrement bas (Figure 77), il atteint d'ailleurs le niveau le plus faible de l'ensemble des électriciens²⁷⁵.

²⁷⁴ Pour la filière éolienne, nous distinguons l'éolien onshore de l'éolien offshore et pour la filière solaire, nous distinguons le photovoltaïque (PV) du solaire à concentration (CSP).

²⁷⁵ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

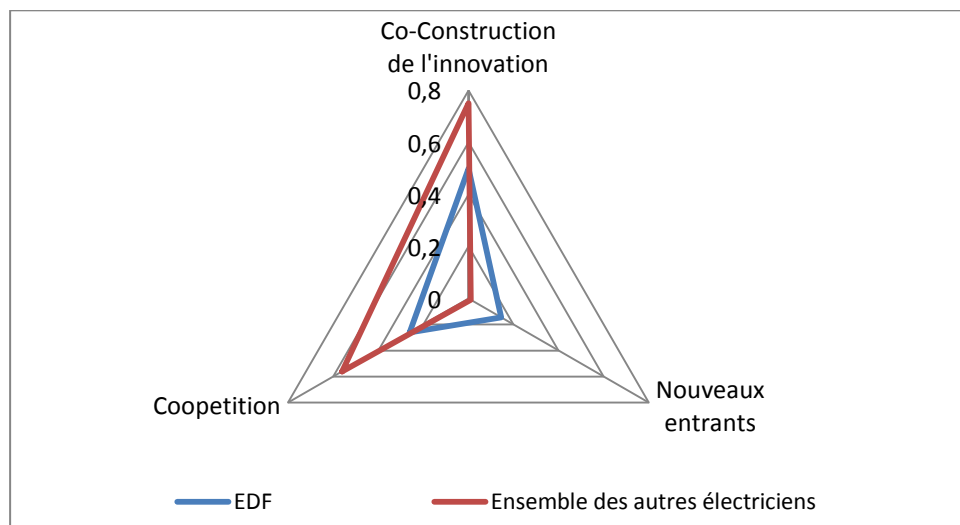
Figure 77 Comparaison du niveau d'ouverture²⁷⁶ de la démarche d'acquisition des connaissances d'EDF avec celui des autres électriciens



Source : auteur

Le niveau extrêmement bas de l'indice d'ouverture est dû aux niveaux des critères « Coopétition » et « Co-construction de l'innovation » particulièrement faibles. Révélateur d'une réticence à innover en collaborant avec son écosystème, cette tendance s'inscrit en contradiction avec le niveau élevé de collaborations avec les nouveaux entrants, bien supérieur aux autres électriciens du périmètre.

Figure 78 : Comparaison d'EDF avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances²⁷⁷



Source : auteur

Le niveau de « Co-construction de l'innovation » étant inférieur à 0,5, EDF se positionne comme un générateur d'innovation²⁷⁸. Il ne faut pas, toutefois, perdre de vue qu'EDF est le

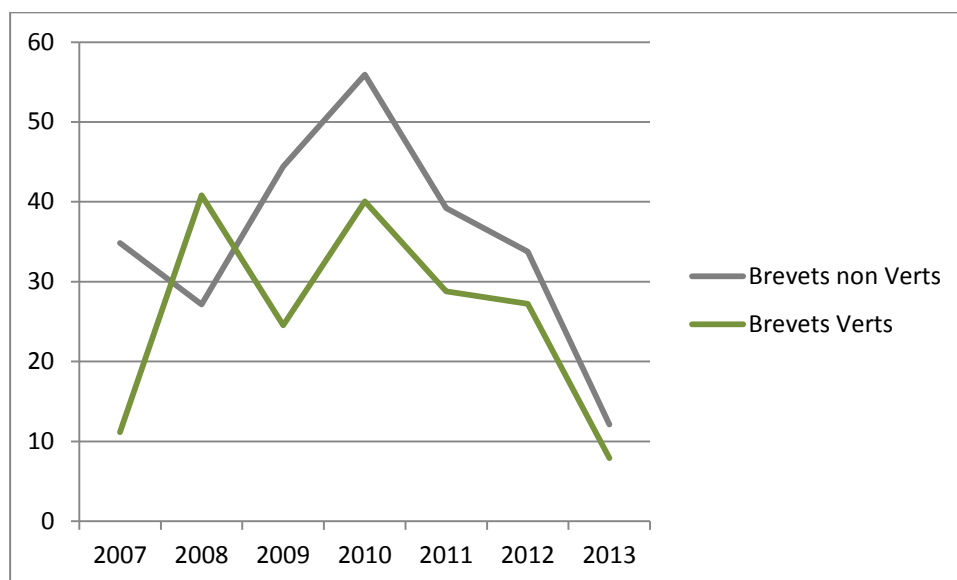
²⁷⁶ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

²⁷⁷ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

²⁷⁸ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui

plus gros participant aux projets collaboratifs ; une contradiction qui tendrait à suggérer que s'inscrire dans une démarche de collaboration avec son écosystème permettrait à EDF d'acquérir du savoir-faire mais que cette dimension n'est pas prédominante dans son modèle d'innovation. Les trajectoires similaires poursuivies par les dépôts de brevets verts et de brevets non verts entre 2007 et 2013 corroborent cette interprétation.

Figure 79 : Evolution des brevets verts et gris d'EDF entre 2007 et 2013



Source : auteur, à partir de la base Patstat et de l'Inventaire vert de l'OMPI

L'expérience acquise dans le nucléaire depuis quarante ans environ a permis à EDF de disposer d'un savoir-faire unique ; et il est fortement probable que le modèle d'innovation fermé et les brevets déposés par l'électricien constituent, en sus du capital requis, une barrière à l'entrée à l'origine de ses avantages compétitifs, qui contribue, au moins en partie, à sa position de leader mondial.

On constate, ensuite, un niveau de « Coopétition » particulièrement faible. D'abord parce que sa stratégie technologique repose principalement sur des filières (fission nucléaire et hydrogène) assez peu sujettes à la collaboration²⁷⁹. Mais le niveau de collaboration d'EDF, qui se révèle inférieur, dans chacune des technologies, à celui des autres électriciens (le groupe français n'est engagé que dans 18 projets, soit 24%, en partenariat avec un compétiteur) est surtout révélateur d'une véritable stratégie. Les collaborations avec d'autres électriciens sont, toutefois, plus importantes dans le domaine des smart grids, en particulier le segment de la gestion IT de la demande, signe qu'EDF souhaite pourtant participer à la définition des standards de transmission des données. En détaillant les électriciens avec lesquels EDF collabore, on remarque que celui avec lequel il conduit le plus de projets est Enel, également l'un de ses principaux partenaires commerciaux (l'Italie importe 10% d'électricité nucléaire de France²⁸⁰). En revanche, le seul projet d'EDF dans le domaine de

innove en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

²⁷⁹ Cf. Chapitre IV, section [2. Analyse des domaines technologiques](#).

²⁸⁰ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

l'éolien offshore (le projet Leanwind) est réalisé en collaboration avec Iberdrola, et cela bien qu'ils aient été en concurrence lors de l'appel d'offre lancé par l'Etat français en 2012. Enfin, notons qu'aucune collaboration n'est menée avec Engie, preuve de la compétition élevée qui se joue entre les deux électriciens français, bien que leur portefeuille d'activité ne soit pas tout à fait identique. En tant que générateur d'innovation, sa volonté de ne pas collaborer avec ses concurrents peut aisément s'interpréter comme une précaution prise pour éviter que l'innovation produite ne soit captée par des tiers.

Dernier constat, la proportion élevée de projets orientés nouveaux entrants, supérieure à celle de l'ensemble des autres électriciens, et, en particulier, sur la filière des énergies renouvelables où un tiers des projets est significativement plus orienté nouveaux entrants : Waudit (éolien onshore), Leanwind (éolien offshore) Molesol (solaire PV).

2.2.3 Conclusion

La stratégie d'EDF est diversifiée (EDF ne réalise aucune impasse technologique), ce que peut expliquer l'ampleur des ressources mobilisées en R&D. Sa stratégie technologique globale est plutôt orientée vers les technologies d'addition, en particulier le nucléaire et les smart grids. Alors que logiquement peu concerné par le CCS, en raison du son faible taux de production aux énergies fossiles, ce dernier est très peu étudié ; deux constats en rupture avec les observations à l'échelle du secteur, mais que justifient la compétitivité des coûts de production de l'électricité d'EDF et sa faible intensité carbone. La France ayant décidé de limiter la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50%, et de porter la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale à 32% d'ici 2030, EDF va, pourtant, devoir accélérer son engagement dans les énergies renouvelables, qui représentent aujourd'hui son deuxième domaine de prédilection.

Comparativement aux autres électriciens, l'acquisition des nouvelles connaissances est plutôt centrée sur ses capacités internes, qu'ouverte sur l'écosystème. Certes, EDF est l'électricien le plus engagé dans les projets collaboratifs, mais on remarque, via la pléthore de brevets déposés, qu'il met en œuvre un modèle de générateur d'innovation plutôt que d'adopteur ; une faible collaboration qui démontre sa volonté de limiter l'accès aux connaissances qu'il produit – un modèle rendu possible par les ressources élevées consacrées à l'innovation.

Ensuite, il semblerait que ses modalités d'acquisition des connaissances relèvent plus d'une stratégie délibérée que de son positionnement technologique : tourné en priorité vers les technologies d'addition, soit des domaines dont le degré d'ouverture est le plus élevé²⁸¹, EDF est pourtant, de tous les électriciens étudiés, celui dont l'indicateur d'ouverture est le plus bas.

²⁸¹ Cf. Chapitre II, section [1.Comparaison des domaines technologiques.](#)

2.3 ENEL

2.3.1 Les enjeux de la transition énergétique

Côté à la bourse de Milan depuis 1999, Enel est la société italienne qui compte le plus grand nombre d'actionnaires (1,1 millions de particuliers et d'investisseurs institutionnels), dont le principal est l'Etat italien qui détient 25,5% des actions de la société en 2015. Malgré le poids de l'Etat à son capital, et son intensité carbone, la plus élevée des électriciens étudiés²⁸² (436 gCO₂/KWh - moyenne pour la période 2007 à 2013 en Europe), Enel ne consacre qu'une part minime de son chiffre d'affaires aux activités de Recherche et Développement.

En raison de la libéralisation à la concurrence des marchés de l'énergie, plafonnant la part de marché de Enel à 50% de la production électrique, de la politique italienne de l'électricité minée par l'échec du programme nucléaire et le soutien au développement des EnR, Enel a dû prendre, à partir des années 2000, une série de décisions pour s'accommoder de cette nouvelle donne ; une réorientation qui s'est traduite par la mise en place d'une politique de diversification sectorielle, d'une stratégie d'internalisation et de la cession de plusieurs de ses actifs.

A partir des années 2000, le leader de l'électricité en Italie développe une stratégie de « multi-utility » : il investit rapidement de nouveaux secteurs d'activité « complémentaires » à son activité historique, tels que le gaz, l'eau ou les télécommunications. En quelques années, Enel change radicalement d'organisation et complète ses activités en faisant l'acquisition d'actifs dans l'immobilier et les services (dont 30% de Télépiù, bouquet numérique filiale de Canal+ en Italie). Cette diversification dans le multiservice, objet de lourds investissements et d'un endettement croissant (passé de 12 à 24 Md€ entre 1999 et 2002) est stoppée dès 2002.

Enel est également présent sur les marchés du gaz dont il est leader en Espagne et en Italie en concurrence avec Eni, fournisseur historique de gaz. En juin 2008, la Commission européenne a donné son feu vert au rachat par Enel, pour 42,5 Md€, du groupe énergétique espagnol Endesa allié du groupe de BTP espagnol Acciona. Aujourd'hui, ses capacités représentent presque la moitié des capacités totales italiennes (42 GW sur 98 GW) et il est en charge de la distribution d'électricité sur une partie du territoire italien. En revanche, il a abandonné l'exploitation de son réseau de transmission, cédé à Terna.

Enel s'est principalement développé en Europe, en Amérique Latine et en Russie. En 2015, sa répartition de vente d'électricité est la suivante : 34% en Italie, 36 % dans la péninsule ibérique, 24% en Amérique Latine et 6% dans les autres pays. En France, par exemple, Enel fournit de l'électricité aux entreprises et a investi dans la construction de deux centrales à cycle combiné gaz dans le nord. En 2014, 39% de la capacité de production d'Enel est

²⁸² Les données relatives à l'intensité des dépenses de R&D, à l'intensité carbone et à la part de l'Etat italien au capital d'Enel sont présentées dans le Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

composée de centrales à gaz et pétrole, les énergies renouvelables dont l'hydraulique représente 38% du mix, le charbon (18%), le nucléaire (5%) et cycle combiné à gaz (17%).

Aujourd'hui, Enel doit faire face à la crise de la demande d'électricité en Italie²⁸³. Les priorités définies par le groupe dans le cadre de son plan stratégique 2014-2018 se concentrent sur une croissance organique continue dans la production d'électricité thermique dans les pays émergents, la production d'électricité issue des EnR, la distribution et la commercialisation d'électricité et de gaz. Pour cela, les trois leviers suivants seront mobilisés :

Tout d'abord, Enel entend restructurer son mix énergétique. Dans un contexte où Enel estime qu'il connaîtra, d'ici 2016, une surcapacité de production en Italie de l'ordre de 8000 MW, l'opérateur a pris la décision de fermer 23 centrales devenues obsolètes et non rentables, dont Trois, Porto Marghera, Alexandrie, Campomarino, Carpi, Camerata P., Bari, Giugliano Pietrafitta. Une fois achevée la construction des centrales en cours, son portefeuille de capacités sera composé comme suit : centrales à gaz et pétrole 32% (soit une diminution de près de 20% par rapport à la part des capacités actuelles), production hydraulique 34,8%, charbon 21%, nucléaire 5,5% et EnR (éolien, solaire, biomasse) 5%.

Par ailleurs, Enel poursuivra son engagement dans la production d'électricité renouvelable principalement sur les marchés hors de l'Italie : Enel Green Power s'est fixé pour objectif d'installer 0,9 GW de nouvelles capacités par an jusqu'en 2018, en se concentrant tout particulièrement sur l'Amérique du Sud, le Moyen-Orient et l'Afrique. Le plan industriel prévoit, en outre, environ 940 M€ d'investissements dans le secteur hydroélectrique. Enel Green Power est également actif dans la production de photovoltaïque de dernière génération, à travers l'usine de 3Sun, opérationnelle en Sicile. Il a aussi constitué une seconde joint-venture avec Sharp : EGP & Sharp Solar Energy (ESSE), dont la mission consiste à développer des installations solaires essentiellement en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique.

Enfin, le positionnement géographique et le développement d'Enel sont dictés par la nécessité d'assainir une situation financière difficile. Le groupe a récemment annoncé avoir l'intention de ramener sa dette à 42 Md€ en 2013 et à 36-37 Md€ à horizon 2017, en procédant, notamment sur cette période, à un programme de vente d'actifs de l'ordre de 6 Md€. Il réorganise ses activités en Amérique Latine à cet effet. Afin de reprendre directement sous son contrôle la branche sud-américaine d'Endesa, qui connaît une forte croissance, le groupe italien envisage d'acquérir une participation de 60,6 % de l'électricien espagnol dans Enersis pour une valorisation de 8,25 Md€. Parallèlement, Enel envisage le placement en Bourse de 17 % à 23 % du capital d'Endesa en vue d'élargir son flottant (8 % aujourd'hui). La part d'Enel dans le capital d'Endesa serait ainsi ramenée de 92% à 70%.

Un contexte porteur d'indications quant aux enjeux d'Enel dans la transition énergétique. Enel ajuste sa trajectoire en se désengageant de la production d'électricité conventionnelle sur ses marchés historiques, notamment en opérant la fermeture des centrales thermiques devenues non rentables, tout en continuant à allouer des ressources pour optimiser les centrales

²⁸³ Cf. Chapitre V, section [2.1.3 Le secteur de l'électricité en l'Italie : un marché en crise.](#)

thermiques existantes (captage et stockage du CO₂...). En matière d'EnR, Enel vise un développement important de ses capacités pour atteindre 13,4 GW en 2018 et prévoit des investissements à hauteur de 6,1 Md€ d'ici quatre ans. L'observation de ses priorités stratégiques met en évidence une diversification géographique et sectorielle à horizon 2018, qui ciblera des marchés offrant des ressources naturelles, des conditions macro-économiques favorables et une demande d'électricité en hausse. On constate, enfin, qu'Enel cherche à renforcer ses investissements en matière d'innovation technologique dans une perspective de réduction des coûts.

Par ailleurs, il est important de noter qu'Enel a pris la décision d'arrêter de se positionner en tant qu'« originateur » des innovations (c'est-à-dire issues de ses activités de R&D). Selon la 15^{ème} Global CEO Survey de PwC (2012), le groupe Enel a clairement établi sa nouvelle orientation : accompagner l'innovation dans son processus de commercialisation et de mise à l'échelle, plutôt que générer de l'innovation en interne.

Enel s'engage aussi à poursuivre ses investissements pour améliorer son réseau électrique en vue de l'intégration des énergies renouvelables. On peut citer, par exemple, le lancement de l'initiative INCENSE, créée par un consortium coordonné par Enel et co-financé par l'Union européenne et qui a pour but de soutenir le développement de 42 start up actives dans le domaine des smart grids en leur consacrant un budget de 6 M€. Notons, en outre, que dès les années 2000, Enel a été précurseur en Europe dans l'installation des compteurs intelligents dont il a équipé ses 30 millions de clients italiens. Des équipements qui offrent la possibilité de proposer des offres commerciales plus attrayantes, de rémunérer les économies d'énergie, et permettent de gérer plus efficacement le réseau de distribution et de production, notamment en écrêtant les pointes - ce qui évite de coûteux investissements.

Signalons, enfin, qu'Enel a été financé à hauteur de 400 M€ par la Commission européenne (dont 100 M€ par l'European Energy Program for Recovery) pour mettre en place un dispositif de captage du CO₂ par post combustion sur la centrale de Porto Tolle, dont le coût total atteint 2,5 Md€ ; un dispositif qui aurait permis d'éviter 1 Mt CO₂ par an si, sous la contrainte d'organisations environnementales, le Conseil d'Etat italien n'avait pas annulé le décret du Ministère de l'Environnement autorisant le lancement du projet. Enfin, Enel développe, sur la centrale de Brindisi, un projet pilote pour tester la technique de captage avant de lancer un démonstrateur de grande échelle, dont la décision finale d'investissement a été repoussée à 2016.

2.3.2 Stratégie d'innovation

La crise de la demande d'électricité en Italie contraint Enel à fermer 23 centrales thermiques d'ici la fin de l'année 2016, et parallèlement à réaliser un investissement significatif dans les énergies renouvelables, d'ores et déjà en œuvre et qui devrait se poursuivre. Enel, l'un des plus importants émetteurs de CO₂ parmi les électriciens étudiés, entame donc un processus de substitution technologique, caractérisé par l'augmentation de la part de ses capacités renouvelables et la diminution de celle de ses capacités thermiques. Dans ces conditions, il

sera intéressant d'apprécier dans quelle mesure la stratégie d'innovation d'Enel se concentre en priorité sur les technologies de substitution ou celles relevant de l'addition.

Si, à l'occasion de la Global CEO Survey menée par PwC en 2012, Enel indiquait qu'il est « déterminé à accompagner l'innovation dans son processus de commercialisation et de mise à l'échelle et [qu'il] se soucie moins de son origination » ; et, dans la mesure où Enel dispose d'une intensité R&D parmi les plus faibles des électriciens étudiés, il sera nécessaire de vérifier la cohérence entre le positionnement formulé et les modalités d'acquisition des connaissances observées. Pour cela, nous identifierons si ces dernières s'inscrivent dans une démarche d'ouverture et, en particulier, si Enel est plutôt un adopteur qu'un générateur d'innovation bas carbone au sens d'Hollanders (2007). Une question d'autant plus intéressante qu'avec seulement 0,1% de son chiffre d'affaire dédié aux activités de R&D, Enel est l'électricien qui consacre relativement le moins de ressources à la R&D de tous les électriciens étudiés.

2.3.2.1 Analyse de la stratégie technologique

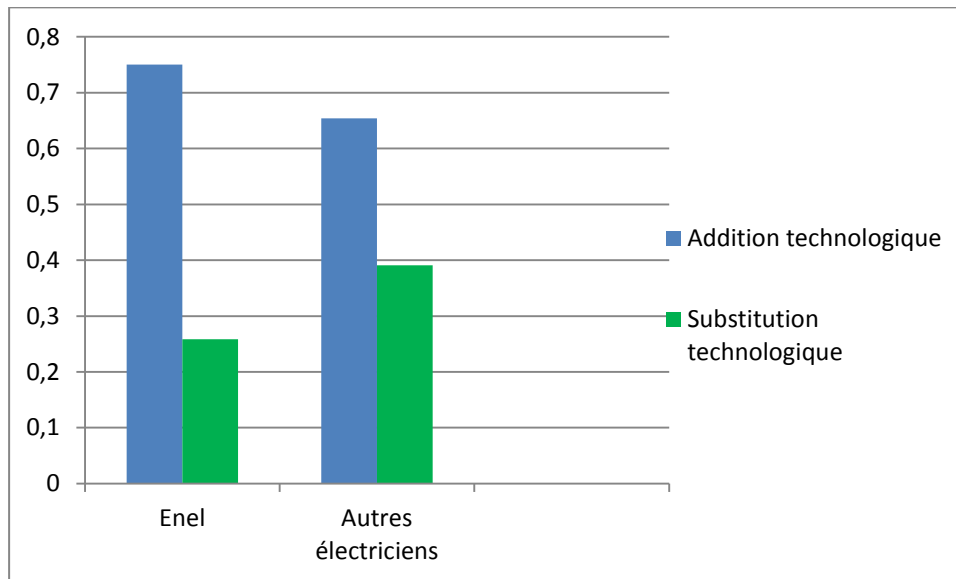
Enel est engagé dans 39 projets du 7^{ème} PCRD dont 36 concernent les technologies étudiées, le nombre le plus important derrière EDF. Le coût total cumulé de ses projets est de 345 M€, avec un financement de la Commission européenne à hauteur de 189 M€. Entre 2007 et 2013, 42 brevets ont été déposés par Enel (35% de brevets verts au sens de l'Inventaire vert de l'OMPI, 7% de brevets verts relevant de technologies non énergétiques²⁸⁴ et 2% de brevets verts énergétiques non inclus dans le périmètre étudié). Au total, Enel a déposé 11 brevets relatifs aux domaines technologiques étudiés.

La comparaison de l'intensité d'engagement (Figure 80) montre qu'Enel oriente sa stratégie technologique en priorité en direction des technologies d'addition. Ce qui peut susciter l'étonnement : d'une part, parce qu'Enel fait l'objet, avec une moyenne de 436gCO₂/KWh²⁸⁵ entre 2007 et 2013, d'une intensité carbone parmi les plus élevées des électriciens considérés, et, d'autre part, parce qu'il s'appuie prioritairement sur des centrales thermiques à gaz, peu rentables, dont certaines ont vocation à être fermées à relativement brève échéance.

²⁸⁴ Les technologies vertes non énergétiques concernent la diminution des impacts sur l'environnement telles que la gestion de l'eau ou des sols.

²⁸⁵ Cf. Figure 65 [Comparaison de l'intensité carbone moyenne des électriciens sur la période 2007-2013](#).

Figure 80 : Comparaison de l'intensité²⁸⁶ de l'engagement d'Enel dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui des autres électriciens

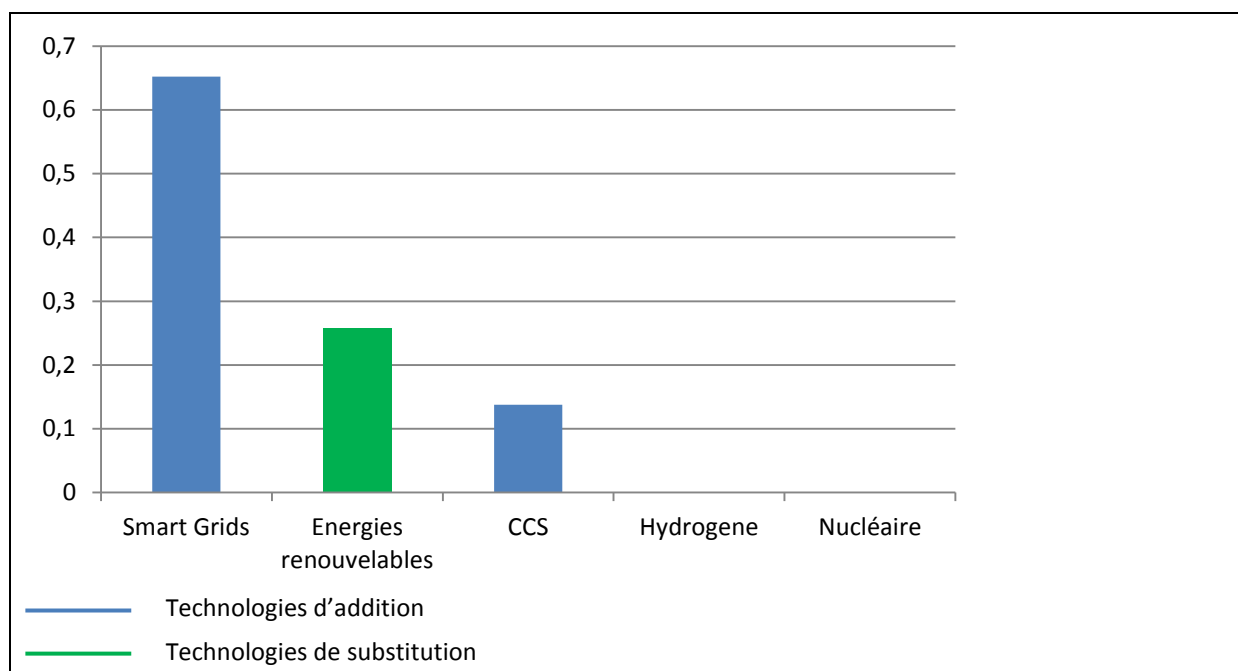


Source : Auteur

Il ressort de l'indicateur à l'échelle des domaines que sa stratégie technologique est concentrée, avec des impasses faites sur l'hydrogène et la fission nucléaire (Figure 81). Si, concernant le nucléaire, l'absence de brevets comme de projets s'explique par la volonté de l'Italie - exprimée lors du referendum de 2011 - de ne pas relancer de programme dans ce domaine, l'impasse sur l'hydrogène est nettement plus surprenante ; Enel est, en effet, derrière ENI, le deuxième importateur de gaz en Italie. Toutefois, cette stratégie de concentration peut s'expliquer par les ressources très limitées consacrées aux activités de R&D.

²⁸⁶ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

Figure 81 : Intensité²⁸⁷ de l'engagement d'Enel à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

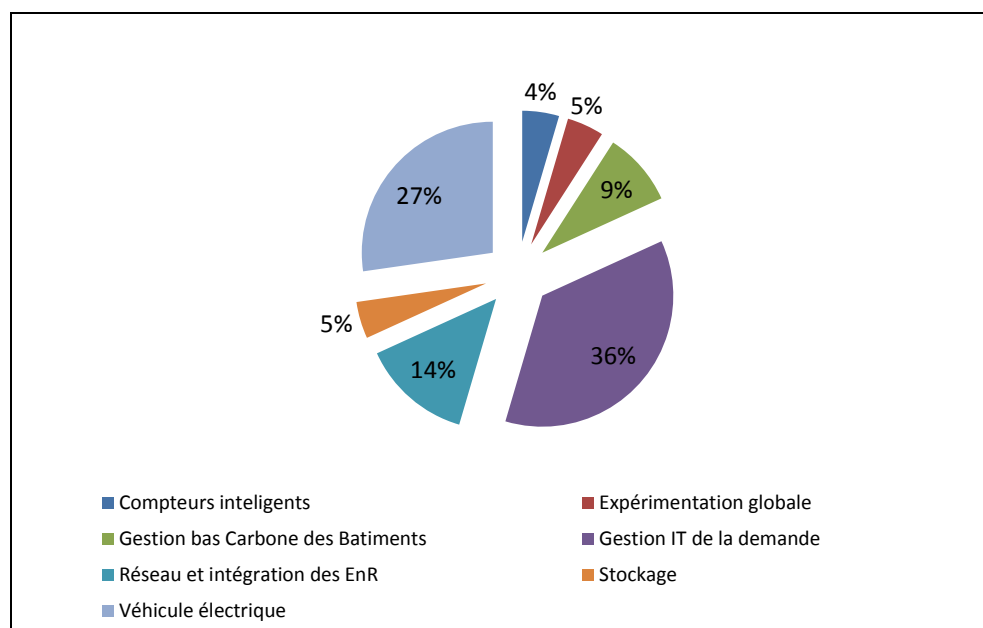
Les trois principaux domaines technologiques explorés par Enel sont les suivants : les smart grids, les énergies renouvelables et le CCS. Peu de surprise concernant les deux premiers, de nature systémique, et dont la maîtrise revêt un aspect stratégique pour les électriciens. On remarquera, d'ailleurs, que la stratégie d'Enel est alignée avec celle observée à l'échelle du secteur²⁸⁸.

En ce qui concerne les smart grids, les 7 brevets ont été déposés exclusivement sur le segment des « compteurs intelligents ». Précurseur en Europe pour l'installation de compteurs connectés dès le début des années 2000, Enel souhaite logiquement continuer à maîtriser cette technologie. En revanche, l'analyse des 22 projets (Enel est, derrière EDF, l'électricien le plus engagé dans les projets relatifs aux smart grids) montre sa présence sur l'ensemble des segments (Figure 82). On peut lire, dans les deux segments plus explorés, à savoir la gestion IT de la demande (36% des projets) et le véhicule électrique (27%), une politique d'optimisation de l'utilisation des centrales thermiques dans un contexte de baisse de la demande d'électricité et une résultante de l'injection massive d'électricité renouvelable prioritaire sur le réseau. En outre, être présent dans le segment de la gestion IT de la demande permet de participer à la définition des standards de télécommunication, alors que la taille du secteur automobile italien qui compte plusieurs leaders mondiaux (Fiat, Piaggio) justifie celle sur le segment du véhicule électrique.

²⁸⁷ L'intensité est mesurée à travers un score tenant compte de la part des brevets et des projets d'Enel dans chacune des technologies par rapport aux nombre total de brevets déposés et au nombre total de projets conduits par l'ensemble des électriciens étudiés. Cf. Chapitre III, section 3. [Présentation de la méthodologie.](#)

²⁸⁸ Cf. Chapitre IV, section 1. [Comparaison des domaines technologiques.](#)

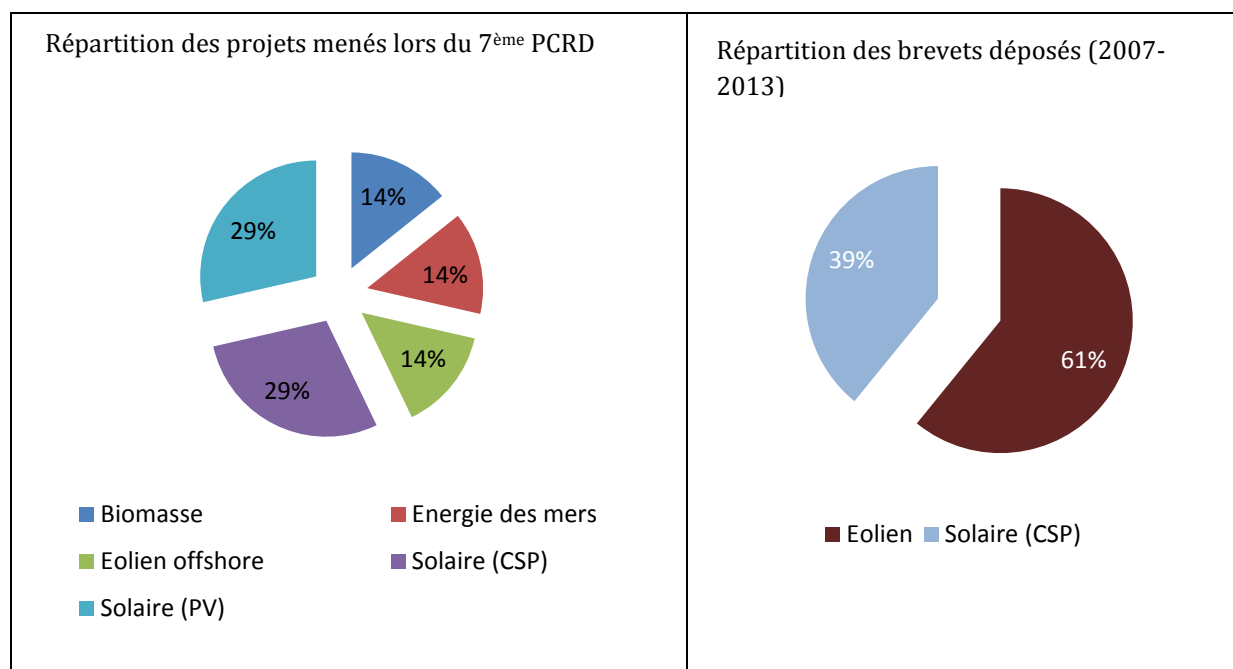
Figure 82 : Répartition des projets menés sur les différents segments des smart grids



Source : auteur à partir de Cordis

Dans le domaine des énergies renouvelables, Enel a été à l'origine du dépôt de 4 brevets et participe à 7 projets, dont la répartition confirme son positionnement sur le solaire (67% des projets). Deux facteurs ont pu jouer quant à cette préférence : le fort soutien de l'Italie sur cette filière (avec 18 609 MWc connecté en 2014 (Observ'ER, 2015, l'Italie est, derrière l'Allemagne, le pays européen qui dispose du plus grand parc photovoltaïque en Europe) et le choix d'Enel d'internationaliser ses activités renouvelables dans des zones très ensoleillées (Amérique du Sud, Moyen-Orient et Afrique).

Figure 83 : Répartition des brevets et des projets d'Enel dans le domaine des énergies renouvelables



Source : auteur à partir de la base Cordis

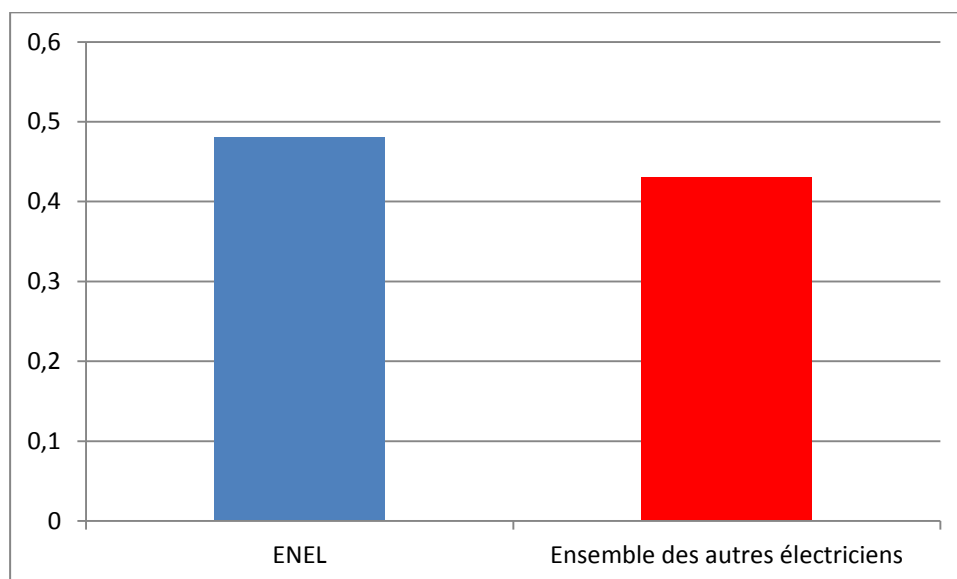
Enfin, avec 7 projets dans le domaine du CCS, Enel se classe en deuxième position, derrière E.ON, probablement en raison de son intensité carbone particulièrement élevée. En outre, cette démarche s'inscrit dans sa stratégie qui vise à améliorer les centrales existantes et éviter qu'elles ne se transforment en actifs « échoués », dans le cas où les contraintes réglementaires pesant sur le CO₂ se renforceraient²⁸⁹.

2.3.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des nouvelles connaissances

La démarche d'acquisition des connaissances d'Enel s'inscrit dans la tendance globale de l'ensemble des autres électriciens. Une analyse de chacun des critères retenus (« Coopétition », « Co-construction », « Collaboration avec les nouveaux entrants ») est donc nécessaire pour comprendre comment elle s'articule précisément.

²⁸⁹ Ce qui pourrait, par exemple, prendre la forme d'un prix de marché du CO₂ significativement plus élevé qu'il ne le fut entre 2007 et 2013.

Figure 84 Comparaison du niveau d'ouverture²⁹⁰ de la démarche d'acquisition des connaissances d'Enel avec celui des autres électriciens



Source : auteur

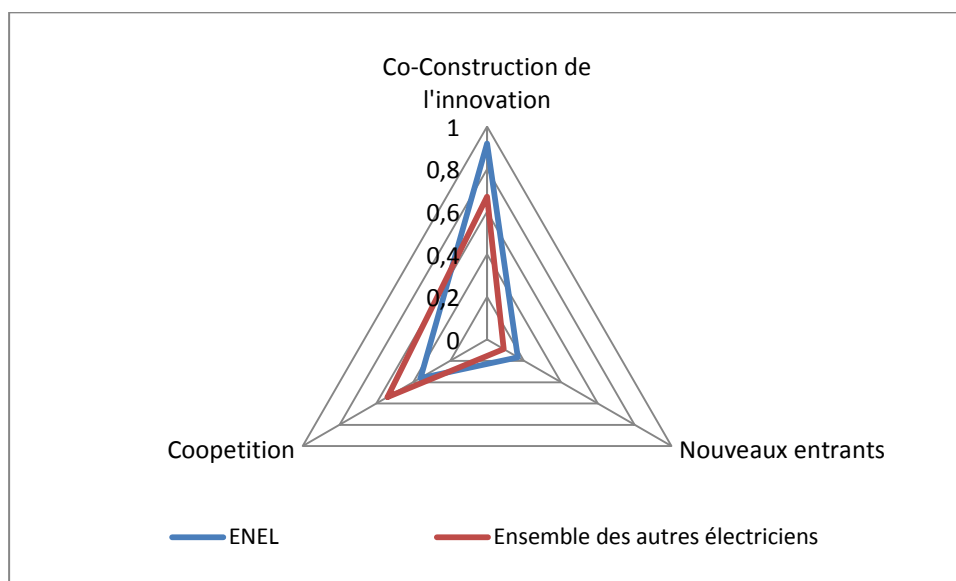
Tout d'abord, notons qu'Enel se positionne plutôt comme un adopteur d'innovation bas carbone²⁹¹ : sa part de projets est proportionnellement plus élevée que celle des brevets²⁹², ce qui signifie qu'Enel s'inscrit davantage dans une démarche de co-construction que dans un modèle de développement interne des inventions. Remarquons également que ce niveau de co-construction est supérieur à l'ensemble des autres électriciens. Un résultat conforme aux déclarations d'Enel qui annonçait « ne plus se positionner comme « originateur » des innovations » et aux conclusions de la Global CEO Survey de PwC, dans lesquelles Enel indiquait qu'il était « déterminé à accompagner l'innovation dans son processus de commercialisation et de mise à l'échelle » ; une stratégie qui se retrouve également dans sa très faible intensité en R&D.

²⁹⁰ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

²⁹¹ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui innovent en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations dans l'introduction des innovations environnementales](#).

²⁹² Le niveau de l'indicateur de co-construction de l'innovation est supérieur à 0,5.

Figure 85 : Comparaison d'Enel avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus²⁹³ pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

Deuxièmement, le niveau de « Coopétition » d'Enel est plutôt faible au regard de celui des autres électriciens. Il est, notamment, nettement moins engagé dans les collaborations avec ses concurrents dans le domaine du CCS, alors même que ce domaine est précisément caractérisé par son haut niveau global de collaboration²⁹⁴. Concernant les énergies renouvelables, Enel n'est engagé dans aucun projet qui associe, au moins, un autre électricien : résultat relativement surprenant pour un adopteur de technologie, qui n'est donc pas exposé au risque de la captation par la concurrence et duquel on attendrait, au contraire, une démarche de coopétition en vue d'acquérir du savoir-faire. Il apparaît, enfin, que l'électricien avec lequel Enel conduit le plus grand nombre de projets est EDF, l'un de ses principaux partenaires commerciaux (avec 28% de ses importations d'électricité en provenance d'Italie, la France est son deuxième plus gros importateur derrière la Suisse, selon les statistiques de Terna, pour l'année 2014).

Troisièmement, on remarque qu'Enel met en œuvre une stratégie de collaboration avec les nouveaux entrants plus marquée que celle des autres électriciens, cohérente avec sa présence plus importante dans les domaines des énergies renouvelables et des smart grids (en particulier gestion IT de la demande et véhicule électrique) qui sont, on l'a vu, des technologies systémiques qui associent une part de nouveaux entrants supérieure aux autres domaines technologiques²⁹⁵.

²⁹³ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

²⁹⁴ Cf. Chapitre IV, section [2.1.2 Le captage et le stockage du carbone](#).

²⁹⁵ Cf. Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grids](#) et section [2.2.2 Les énergies renouvelables](#).

2.3.3 Conclusion

Bien que le secteur italien de l'électricité, et Enel en particulier, traverse une crise sans précédent qui le contraint à fermer plusieurs centrales thermiques, et qu'Enel soit l'un des électriciens les plus fortement émetteurs en carbone, sa stratégie est plutôt orientée vers les innovations relevant de l'addition technologique et, cela, dans des proportions supérieures à celle des autres électriciens. Par ailleurs, ses priorités technologiques sont conformes à celles observées à l'échelle du secteur, dirigées vers les deux domaines les plus systémiques (énergies renouvelables et smart grids). On retiendra, enfin, que la stratégie technologique est plutôt concentrée, probablement en raison de son faible investissement en R&D.

Concernant l'acquisition des connaissances, Enel fait l'objet d'une démarche remarquablement ouverte, en ligne avec ses déclarations d'intention formulées à l'occasion de la Global Innovation Survey réalisée par PwC en 2012, où il affirmait moins se soucier de l'origination en interne des innovations que de « l'accompagnement l'innovation dans son processus de commercialisation et de mise à l'échelle ». Une démarche d'ouverture somme toute assez « rassurante » au regard de la part particulièrement faible du chiffre d'affaires consacrée à la R&D. Enel est caractérisé par un profil d'adopteur d'innovation bas carbone, et, à ce titre, s'appuie prioritairement sur les collaborations avec l'écosystème pour bénéficier de savoir-faire plutôt que sur la génération interne de l'innovation. Notons, enfin, que ses collaborations se font pour l'essentiel avec les nouveaux entrants, et qu'il participe moins que les autres électriciens à des projets collaboratifs avec d'autres électriciens.

2.4 E.ON

2.4.1 Les enjeux de la transition énergétique

Depuis 2012, E.ON a procédé à l'arrêt de l'équivalent de 10 500 MW de capacités installées, et la fermeture des centrales devrait encore toucher 1 500 MW supplémentaires. Fin 2014, le groupe a annoncé une scission de ses activités : il entend conserver ses activités réseaux et la génération d'électricité renouvelable mais se séparer des activités de production d'électricité à partir des énergies fossiles. Présent non seulement en Europe (principalement en Allemagne, en Europe de l'Est et en France), mais aussi en Russie, au Brésil et en Turquie, E.ON est l'électricien allemand le plus internationalisé. Mais il fait également partie des électriciens à l'intensité carbone la plus élevée, et de R&D la plus faible²⁹⁶ de notre périmètre d'étude.

Né en 2000 de la fusion des groupes allemands VEBA AG et VIAG, fournisseur mondial de solutions énergétiques, E.ON est l'une des plus importantes entreprises du secteur de l'électricité et du gaz au monde avec un chiffre d'affaires de 112 Md€ en 2014. Ses activités sont diversifiées : production d'électricité à partir de ressources renouvelables et conventionnelles, fourniture de gaz naturel, négoce d'énergie, vente et, dans une moindre mesure, distribution. E.ON a également développé une activité de conseil, E.ON Consultancy Services, qui accompagne les collectivités locales dans la définition et la mise en œuvre de leur stratégie énergétique. En 2015, la capacité totale d'E.ON atteint 46 479 MW répartie de la manière suivante : le gaz (40%), suivi du charbon (16,5%), du nucléaire (14%), du pétrole (5%) et de la lignite (7%). Dans le domaine des énergies renouvelables, l'hydraulique et l'éolien occupent, chacun, une proportion comparable : 8% pour le premier et 8,5% pour le second. Notons que la plupart de ses capacités nucléaires installées sont situées sur le territoire allemand.

Depuis quelques années, E.ON a réorienté ses activités vers les segments à fort potentiel de croissance, comme les EnR en Europe et aux USA, les services énergétiques et la production décentralisée (mini-centrales, réseaux de chaleur en Scandinavie et en Allemagne notamment). Et s'est parallèlement introduit dans les pays émergents au fort potentiel de croissance, en nouant des alliances avec des acteurs locaux (par exemple, Dega en Russie).

Dans le cadre de sa stratégie de transition énergétique, E.ON a développé le « Cleaner and Better energy », articulée autour des quatre axes suivants :

Un recentrage géographique sur les positions les plus solides du groupe en Europe, tout en développant simultanément ses activités hors d'Europe (25 % de l'Ebitda en 2015). Dans le contexte de la crise du secteur électrique en Europe, E.ON a décidé de réduire la voilure sur le vieux continent : cessions attendues de certaines filiales, repositionnement sur un nombre limité de pays, diminution des investissements, réduction des coûts, mise à l'arrêt provisoire

²⁹⁶ Les données relatives à l'intensité des dépenses de R&D et à l'intensité carbone sont présentées dans le Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

ou définitive de certaines centrales de production (à hauteur de 2 400 MW, entre janvier et juin 2013), et prévoit de poursuivre dans cette dynamique.

La substitution d'une stratégie à forte intensité capitaliste par un modèle basé sur les savoir-faire et la formation de partenariats innovants²⁹⁷. Dans le secteur de l'éolien, E.ON a mis en œuvre une nouvelle politique : le groupe assure la conception, le développement et la construction du parc, mais, après la mise en service, une partie ou l'intégralité est vendue à un partenaire (E.ON ne conservant que la gestion des opérations).

La diminution de son intensité carbone, et l'identification de nouvelles applications pour l'électricité, comme par exemple la mobilité bas carbone. Dans un effort de décarbonisation de sa production, E.ON entend élargir ses capacités d'énergies nouvelles et les intégrer à un système de réseaux intelligents et de dispositifs de stockage. Toutefois, afin de sécuriser sa production d'électricité, E.ON n'entend pas tout miser sur le solaire et l'éolien, trop exposés aux aléas du climat. Il compte également sur le renforcement et l'élargissement de son parc de centrales thermiques dans les pays en développement et l'investissement dans des turbines à pompage propre ou des centrales hydrauliques.

Enfin, pour soutenir le déploiement de sa nouvelle stratégie énergétique, E.ON s'est doté d'un département Technologie & Innovation. Sur la période 2007-2013, il consacre 100 M€ par an, (0,1% de son chiffre d'affaires) à la R&D, soit la plus faible part des électriciens considérés²⁹⁸. Ce département s'appuie sur 14 unités de recherche et développement, situées dans le monde entier, et principalement concentrées sur les EnR, le stockage, les réseaux intelligents, ou l'électro-mobilité.

E.ON a développé des projets pilotes sur les sites de Maasvlakte en partenariat avec Engie (projet ROAD, visant à capter 1,1 Mt CO₂ par an), Staudinger, et Wilhelmshaven afin de tester la technique de post-combustion. En Suède, il équipe 120 000 clients de compteurs intelligents qui vont permettre de réduire la consommation électrique. Il teste également des solutions de gestion de l'énergie : les 12000 habitants du quartier pionnier de Hyllie en Suède devraient, d'ici 2020, être fournis en électricité renouvelable à 100%. Aujourd'hui, E.ON s'appuie sur la transition énergétique pour expérimenter et créer de nouveaux modèles d'activités et d'affaires, relatif notamment à la production d'électricité à partir de gaz, et entrer dans une démarche partenariale avec des acteurs clés du secteur du big data (par exemple, avec Ericsson pour les outils de prévision et d'analyse pour les smart grids).

Pour relever le défi du stockage de l'électricité d'origine renouvelable, sans recourir au renforcement des réseaux d'électricité, E.ON a fait le choix d'expérimenter le « Power to gas ». Ce système consiste à stocker la surproduction des énergies renouvelables en les transformant en hydrogène ou en méthane de synthèse. Les réseaux existants de gaz naturel peuvent accueillir l'hydrogène ou le méthane ainsi produit et pourvoir à leur stockage, leur transport et leur valorisation par mélange avec le gaz naturel. Cette technologie a été testée par le biais d'une unité de démonstration en août 2013 sur le site de Falkenhagen et a conduit

²⁹⁷ Source : Rapport annuel 2014 d'E.ON.

²⁹⁸ Cf. Chapitre V, section [1.Comparaison des électriciens](#).

à l'injection de plus de 2 millions de KWh d'hydrogène dans le réseau de gaz, permettant de subvenir aux besoins de 150 habitations.

En complément de ses capacités internes d'innovation, E.ON investit dans les start up des technologies énergétiques. En 2014, il a réalisé les prises de participation suivantes : AutoGrid qui offre des solutions d'analyse prédictive de la production et de la consommation d'électricité à destination des opérateurs de réseau, des producteurs d'électricité et des compagnies de services énergétiques. Sungevity qui propose de rendre les technologies solaires plus abordables pour les consommateurs. Thermondo qui aide les particuliers à acheter des unités de chauffage plus respectueuses de l'environnement en permettant de comparer et d'acheter une variété de chauffages. Et Leo qui développe et fournit des solutions de gestion des données énergétiques pour les particuliers.

Cependant, malgré ses récents efforts pour réussir sa mue vers un modèle plus sobre en carbone, E.ON traverse une crise de taille. Pour l'année 2014, il a enregistré une perte de 3,2 Md€ et dépassé 5,4 Md€ de charges de dépréciation sur des centrales en Grande-Bretagne, en Suède et en Italie. Cette annonce intervient dans un contexte où, suite à la chute des prix de gros de l'électricité et à l'introduction massive d'électricité d'origine renouvelable, E.ON a annoncé son intention de scinder en deux ses activités et de se séparer de ses activités de production conventionnelle d'électricité (au sein de la société Uniper qui devrait être introduite en bourse en 2016) et de se recentrer sur les énergies renouvelables et les réseaux de distribution. Cette restructuration est une transformation sans précédent dans le secteur électrique pour faire face aux défis de la transition énergétique.

2.4.2 Stratégie d'innovation

Deux éléments attestent de la réorientation du groupe vers des technologies de substitution : la mise à l'arrêt de certaines de ses centrales thermiques conjointes au développement de nouvelles capacités renouvelables et la scission annoncée des activités thermiques d'E.ON dans UNIPER, opération qui donnera naissance au premier groupe énergétique concentré sur des technologies bas carbone. Dans ces conditions, et, au regard de son intensité carbone particulièrement élevée²⁹⁹, il est intéressant d'observer dans quelle mesure la stratégie technologique d'E.ON, est, sur la période 2007 à 2013, orientée vers la substitution technologique. D'autant plus qu'E.ON est particulièrement engagé dans le gaz qui représente environ 50% de ses revenus³⁰⁰. En outre, E.ON revendiquant un modèle d'innovation ouvert, il sera nécessaire d'analyser ses modalités d'acquisition des nouvelles connaissances, en vérifiant si les brevets déposés et les projets conduits confirment ou infirment cette position.

²⁹⁹ Sur la période 2007-2013 l'intensité carbone atteignait en Europe 417 gCO₂/KWh d'électricité produite.

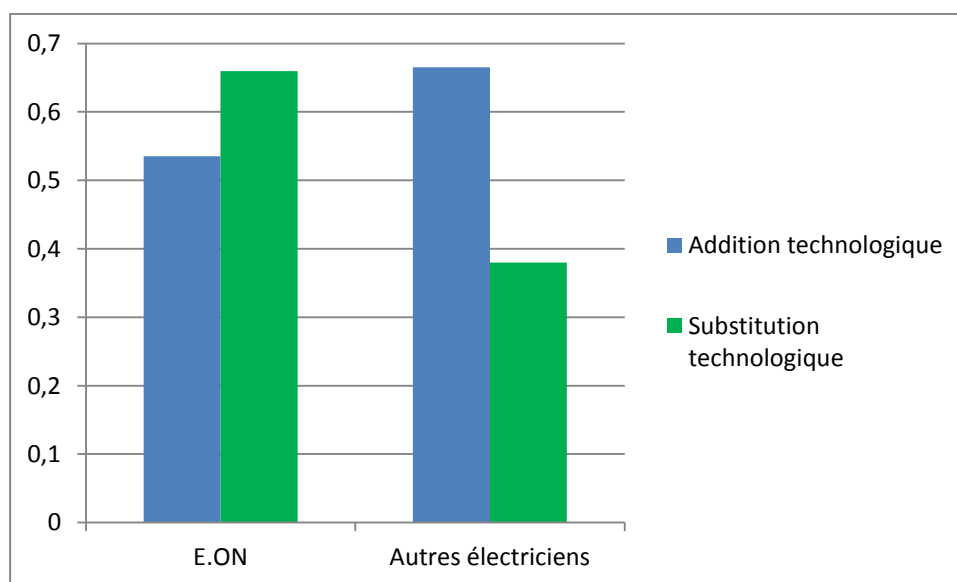
³⁰⁰ Estimation basée sur le rapport annuel d'E.ON publié en 2016 portant sur l'année 2015.

2.4.2.1 Analyse de la stratégie technologique

E.ON est engagé dans 26 projets du 7^{ème} PCRD dont 24 concernent les technologies étudiées. Le coût total cumulé de ces projets est de 185 M€, avec un financement de la Commission européenne de 116 M€. Entre 2007 et 2013, 43 brevets ont été déposés. 67% ne concernent pas des brevets verts au sens de l'Inventaire vert de l'OMPI, soit la proportion la plus élevée de tous les électriciens, juste derrière Engie, plausiblement parce qu'E.ON n'est pas un « pure player » de l'électricité. La part des brevets verts relevant de technologies non énergétiques³⁰¹ est de 7%, et celle brevets verts énergétiques non inclus dans le périmètre d'étude de 19%. Au total, seulement trois brevets concernent les domaines technologiques étudiés³⁰² (soit seulement 8% de son portefeuille). La forte proportion de brevets verts énergétiques hors de notre périmètre (19%), parmi les plus élevées des électriciens étudiés, tendrait à signifier, qu'au-delà des technologies bas carbone prises en compte ici, il s'appuie davantage sur des technologies relatives à l'amélioration des performances des centrales thermiques (hors CCS).

La stratégie technologique d'E.ON diffère de celle des autres électriciens à plusieurs titres. Parce que c'est l'électricien le plus engagé dans les technologies de substitution, alors même que nous avons observé que les électriciens les plus émetteurs étaient plutôt orientés vers les technologies d'addition³⁰³. Et parce qu'il est, aussi, le seul dont la stratégie technologique est également fléchée vers des technologies de substitution.

Figure 86 : Comparaison de l'intensité³⁰⁴ de l'engagement d'E.ON dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui des autres électriciens



Source : auteur

³⁰¹ Les technologies non énergétiques concernant la diminution des impacts sur l'environnement telles que la gestion de l'eau ou des sols.

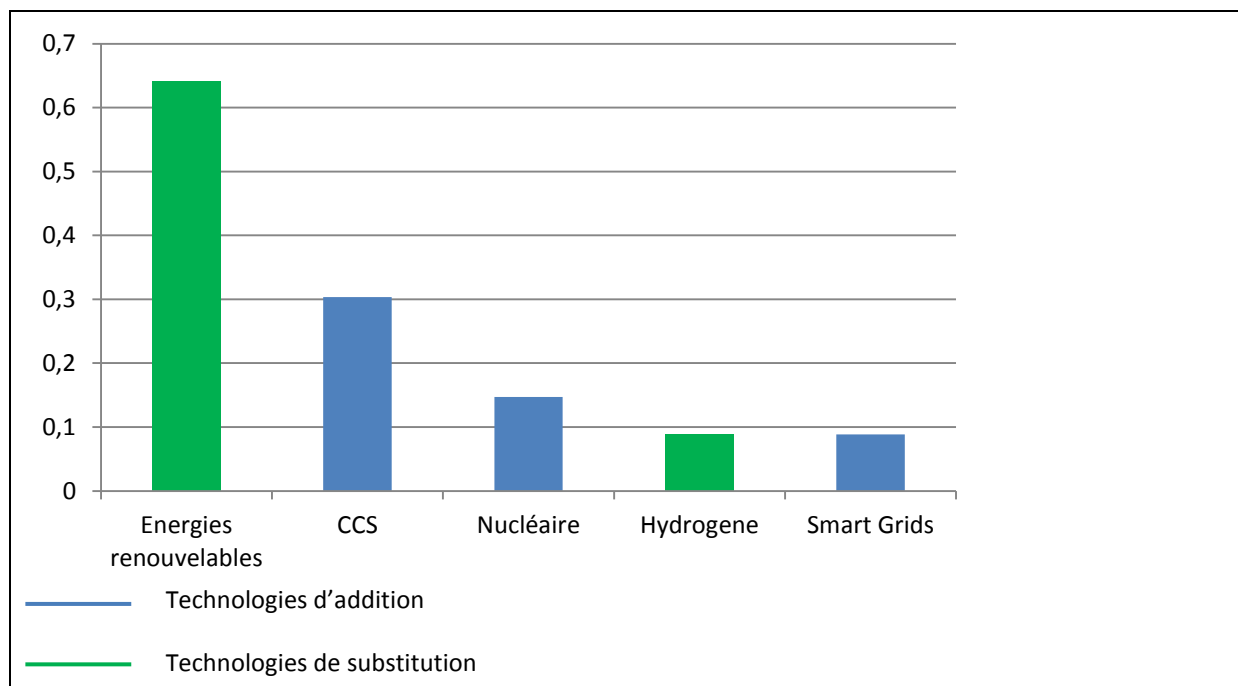
³⁰² CCS, énergies renouvelables, fission nucléaire, hydrogène et smart grids.

³⁰³ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

³⁰⁴ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

De plus, contrairement aux autres électriciens fortement émetteurs en carbone, E.ON est présent sur l'ensemble des secteurs étudiés, alors même qu'il consacre une part moindre de son chiffre d'affaires aux activités de R&D.

Figure 87 : Intensité³⁰⁵ de l'engagement d'E.ON à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

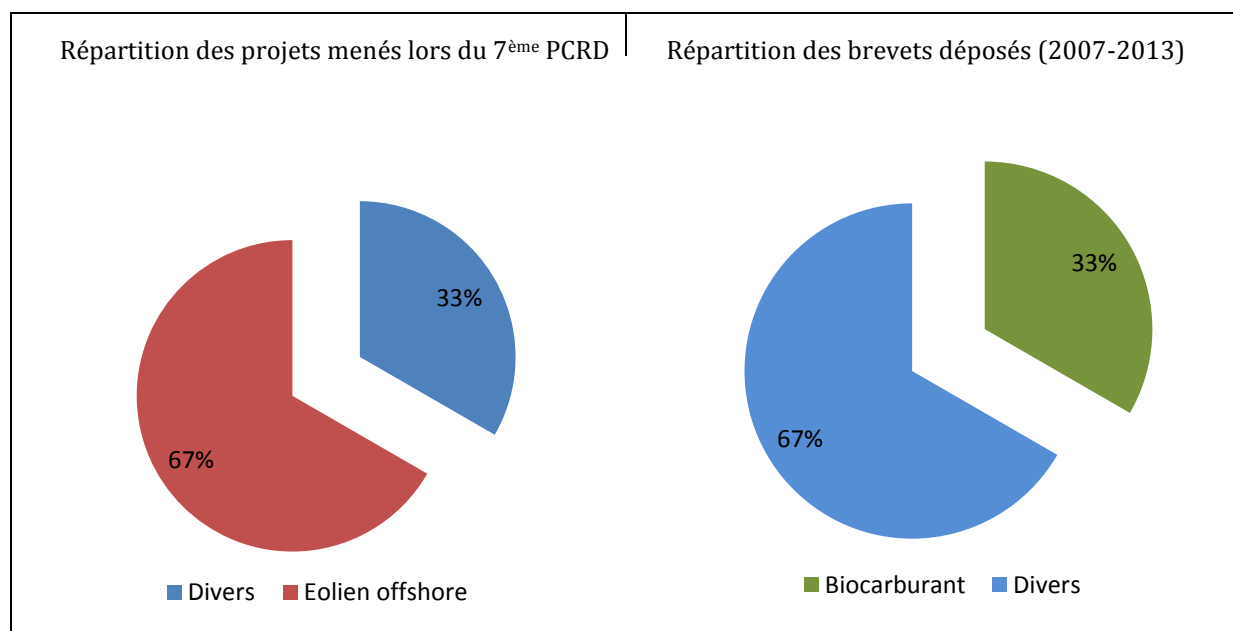
E.ON explore en priorité les énergies renouvelables, le CCS et le nucléaire. Contrairement à ce que l'on a pu observer dans le chapitre précédent³⁰⁶, à savoir que smart grids et énergies renouvelables (les deux domaines les plus systémiques) constituaient les deux priorités technologiques à l'échelle du secteur électrique, les smart grids se classent, dans son cas, au dernier rang.

Les énergies renouvelables couvrent 13% du portefeuille de projets et 90% du portefeuille de brevets : E.ON est l'électricien qui explore ce domaine dans les proportions les plus élevées. Le détail de ces portefeuilles fait état d'une concentration autour de deux filières : l'éolien offshore, qui s'inscrit dans la stratégie d'E.ON d'investir sur les technologies dont la croissance est significative, et les biocarburants qui s'expliquent par sa présence dans le secteur de la gestion des déchets. En outre, E.ON se démarque de ses concurrents par son absence du photovoltaïque, constat surprenant au regard de son positionnement résolu dans les énergies renouvelables, et de l'investissement de l'Allemagne dans cette technologie.

³⁰⁵ L'intensité est mesurée à travers un score tenant compte de la part des brevets et des projets d'E.ON dans chacune des technologies par rapport au nombre total de brevets déposés et au nombre total de projets conduits par l'ensemble des électriciens étudiés. Cf. Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

³⁰⁶ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

Figure 88 : Répartition des brevets et des projets d'E.ON dans le domaine des énergies renouvelables



Source : auteur, à partir des bases Cordis et Patstat

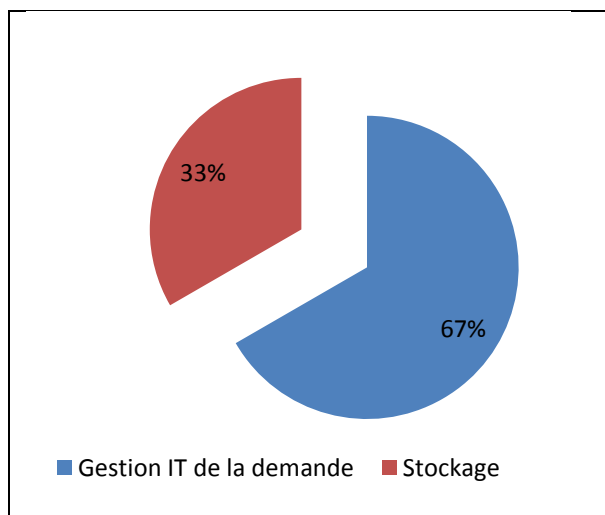
Le domaine du captage et du stockage du carbone est le deuxième investi par E.ON (42% des projets) qui se classe, avec 10 projets, au premier rang des électriciens sur ce segment. E.ON explore l'ensemble de la chaîne du CCS, du captage au stockage (projet RISCs), en passant par le transport (projet CO2EUROPIPE). Les projets relatifs au captage du carbone couvrent aussi bien les techniques d'oxycombustion (RELCOM) que de post-combustion (CESAR, OCTAVIUS et HIPERCAP). La place importante dévolue au CCS dans sa stratégie technologique se comprend logiquement, au vu du niveau de l'intensité carbone de sa production d'électricité et de la composition de son mix électrique (qui repose principalement sur des centrales thermiques). Dans un contexte où ses unités de production en surcapacité l'amènent à déprécier des actifs et à procéder à la fermeture de plusieurs d'entre elles, la technologie du CCS, dès lors qu'elle serait compétitive, permettrait à E.ON de limiter le nombre « d'actifs échoués », phénomène qui risque de se renforcer si le prix de marché de la tonne de CO₂ venait à augmenter.

Dans le domaine du nucléaire, avec une participation à cinq projets, E.ON fait partie avec EDF, des électriciens les plus engagés. D'une part, parce qu'il est historiquement investi dans cette technologie (14% de ses capacités totales, installées en Suède et en Allemagne) et d'autre part en raison du rôle du nucléaire dans la transition bas carbone. Cependant, au vu de la sortie programmée de l'Allemagne d'ici 2022, ce choix d'orientation s'avère, aujourd'hui, une décision contestable.

Dernier constat saillant, E.ON est l'électricien qui explore le moins le domaine des smart grids, alors même qu'il est l'un des plus importants distributeurs d'électricité en Allemagne. Les smart grids représentent seulement 13% de son portefeuille de projets et aucun brevet n'a été déposé dans ce domaine. Si le segment de la gestion IT de la demande est, comme pour la plupart des électriciens, bien présent dans le portefeuille de projets, notons qu'E.ON est

l'électricien qui se consacre le plus au segment du stockage. Un centre d'innovation spécifique a été inauguré, en charge d'évaluer les processus de stockage d'énergie, de les tester à différentes échelles et de mettre en place des pilotes connectés aux systèmes d'énergie.

Figure 89 : Répartition des projets d'E.ON dans le domaine des smart grids



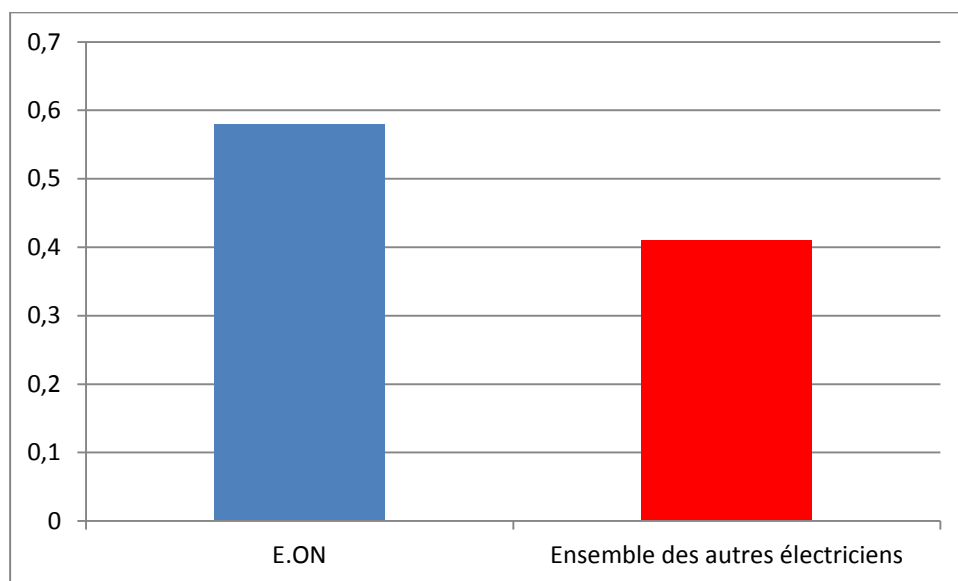
Source : auteur à partir de la base Cordis

Enfin, notons qu'E.ON est l'un des rares électriciens (avec Engie et EDF) à explorer la technique de l'hydrogène : avec les projets FC-EUROGRID, qui propose d'apprécier l'impact du développement des technologies de pile à combustible sur le réseau électrique, HYUNDER, qui explore le stockage de l'électricité renouvelable à grande échelle et SOFT-PACT qui expérimente la pile à combustible dans une application de micro cogénération, dont il est coordinateur et qui s'inscrit dans sa stratégie de production décentralisée. Mais au regard de sa position de co-leader européen du gaz, sa présence sur ce segment reste relativement peu affirmée.

2.4.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des connaissances

E.ON est, derrière Iberdrola, l'électricien qui propose la démarche d'acquisition des connaissances la plus ouverte et manifeste sa volonté de travailler avec les parties prenantes pour acquérir les nouvelles connaissances ; ce qui confirme sa position exprimée dans le rapport annuel de 2014.

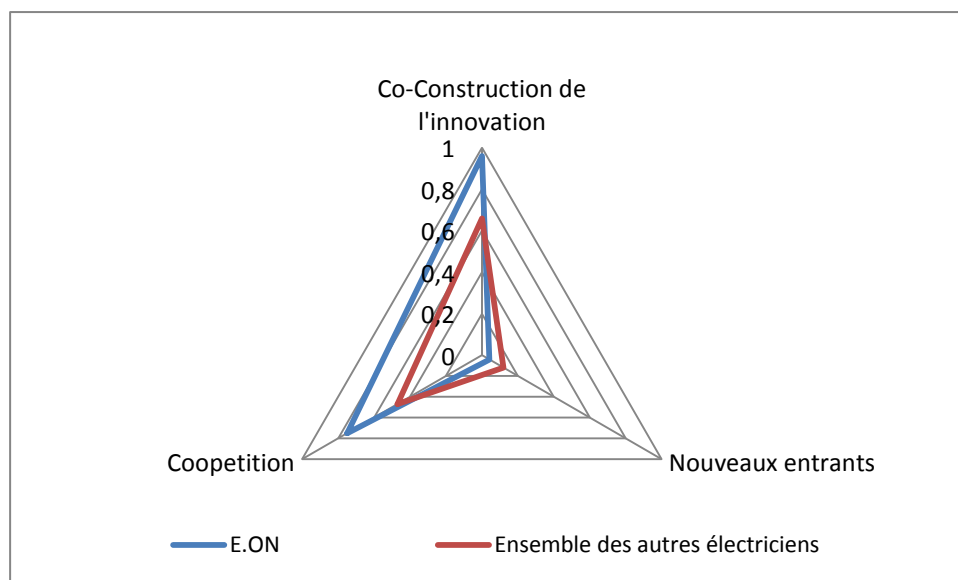
Figure 90 : Comparaison du niveau d'ouverture³⁰⁷ de la démarche d'acquisition des connaissances d'E.ON avec celle des autres électriciens



Source : auteur

L'analyse des critères permettant de mesurer le niveau d'ouverture de la stratégie d'acquisition des connaissances met en évidence des niveaux de « Coopétition » et de « Co-construction de l'innovation » particulièrement élevés.

Figure 91 : Comparaison d'Enel avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus³⁰⁸ pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

³⁰⁷ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

³⁰⁸ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

Par rapport aux autres électriciens, E.ON se positionne comme un adopteur d'innovation³⁰⁹. La part de projets conduits est très faible par rapport au nombre de brevets déposés : la stratégie d'innovation d'E.ON s'inscrit dans une démarche de co-invention avec les parties prenantes plutôt que de génération d'innovation en interne ; un résultat à mettre en perspective avec son investissement remarquablement bas en R&D.

Parallèlement, son niveau de coopération est particulièrement élevé ; ce qu'explique la part conséquente du CCS dans sa stratégie technologique, propice aux collaborations entre électriciens³¹⁰. Mais on observe une stratégie de collaboration soutenue avec les concurrents, y compris dans le domaine des énergies renouvelables, alors que nous avons mis en évidence qu'il ne s'y prêtait guère : 67% des projets menés dans les énergies renouvelables associent au moins un autre électricien, contre 39% seulement pour l'ensemble des électriciens. Les deux principaux partenaires d'E.ON sont EDF et RWE, et les collaborations engagées portent, sans surprise, essentiellement sur le CCS. Notons ici que cette démarche de collaboration avec les électriciens est cohérente avec la stratégie de co-crédation d'innovation mise en œuvre, et confirme sa volonté de partager les connaissances.

En revanche, E.ON mène moins de projets orientés nouveaux entrants que les autres électriciens ; mais le nucléaire et le CCS, explorés en priorité par E.ON, associent peu, à l'échelle du secteur, les nouveaux entrants³¹¹ - en revanche, c'est également le cas sur les énergies renouvelables qui connaissent pourtant une tendance contraire.

2.4.3 Conclusion

Il est, au préalable, important de souligner que E.ON est l'un des électriciens qui explore le moins les domaines technologiques de notre périmètre.³¹²

E.ON se démarque, en particulier si on le compare à ceux qui, tout comme lui, sont fortement émetteurs en carbone, par un positionnement plus affirmé sur les technologies relevant de la substitution. Ce qui, en soi, peut être interprété comme un signal encourageant, au regard de la scission d'actifs à venir, qui va reconcentrer sa stratégie sur les énergies renouvelables et les réseaux, (même si on peut ici s'étonner de son faible intérêt pour les smart grids). On note, en revanche, sur la période considérée un engagement soutenu dans le nucléaire, dont l'Allemagne a programmé de sortir totalement d'ici 2022 ; qui s'avère donc, ex post, une

³⁰⁹ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui innoveraient en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

³¹⁰ Cf. Chapitre IV, section [2.1.2 Le captage et le stockage du carbone](#).

³¹¹ Cf. Chapitre IV, section [2.1.2 Le captage et le stockage du carbone](#).

³¹² Ce constat est particulièrement notable pour les brevets. D'une part, on observe que les brevets déposés dans les domaines technologiques étudiés ne représentent que 8% des brevets total déposés. D'autre part, les brevets verts « non étudiés » représentent 19% soit le score le plus élevé des électriciens étudiés.

stratégie assez peu pertinente. Notons qu'en dépit de sa faible intensité R&D, E.ON est présent sur chacune des cinq domaines technologiques étudiés.

En outre, on remarque que ses modalités d'acquisition des nouvelles connaissances se font selon une démarche particulièrement ouverte, au deuxième rang sur ce critère juste derrière Iberdrola. Or, il ressortait de la comparaison entre électriciens³¹³ que ceux présentant une production d'électricité fortement carbonée (catégorie à laquelle appartient E.ON) n'étaient précisément pas les plus ouverts. E.ON apparaît, ici, singulier parmi ses pairs, mais aussi en cohérence avec les déclarations de son rapport d'activité. Une démarche d'ouverture qui se traduit par un profil d'adopteur d'innovation : la priorité est donnée aux interactions avec l'écosystème plutôt qu'à la génération interne d'innovation, et aux collaborations avec ses concurrents. Un positionnement plutôt cohérent au regard de son faible investissement en R&D.

Enfin, il semblerait que les modalités d'acquisition des connaissances soient formalisées au sein d'une stratégie : dans la mesure où E.ON est caractérisé par son engagement significatif dans les technologies de substitution - alors même que celles-ci font plutôt l'objet d'une démarche d'ouverture limitée³¹⁴ - sa politique d'ouverture très affirmée résulterait, non pas de son positionnement technologique, mais bien d'une stratégie prédéterminée.

³¹³ Cf. Chapitre V, section [1 Comparaison des électriciens](#).

³¹⁴ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

2.5 ENGIE

2.5.1 Les enjeux de la transition énergétique

Troisième plus grand groupe mondial³¹⁵ du secteur de l'énergie (hors pétrole), Engie (ex GDF Suez) est né de la fusion, en 2008, entre Gaz de France et Suez. Engie possède un portefeuille d'activités diversifié : l'entreprise est présente sur toute la chaîne gazière (elle est, en 2016, le premier importateur en Europe), dans les services énergétiques aux collectivités et dans l'électricité (sixième producteur en Europe en 2016). Engie est le cinquième producteur européen d'électricité et dispose, via sa filiale GRDF, du premier réseau de distribution de gaz naturel européen. Fin 2010, Engie a fait l'acquisition du producteur d'électricité britannique International Power, a renforcé l'internationalisation de ses activités et porté cette même année à 113,7 GW sa puissance électrique totale, devenant ainsi l'un des tous premiers producteurs mondiaux d'électricité. Si l'Etat français reste présent au capital d'Engie, il a, en peu de temps, diminué drastiquement sa participation, qui est tombée de 70% en 2004 à 32,7% au 31 décembre 2015. Enfin, malgré son essaimage géographique (le groupe est présent dans 70 pays), il a subi de plein fouet la crise du secteur énergétique européen qui l'a contraint début 2014 à déprécier ses actifs de 14,9 Md€³¹⁶, d'où une perte enregistrée de 4,6 Md€ sur l'exercice 2015. Par ailleurs, signalons qu'Engie, est comparativement aux autres électriciens³¹⁷, relativement faiblement émetteur en carbone.

Le groupe a rencontré en 2013 d'importants succès commerciaux et industriels dans plusieurs pays émergents : il a fait son entrée sur les marchés sud-africain, marocain, indien et mongolien, et renforcé ses positions en Azerbaïdjan, au Brésil et en Uruguay. En 2015, il dispose d'une capacité de production d'électricité de 117 GW, dont le parc est l'un des plus diversifiés au monde. Cette même année, la répartition de ses capacités de production électrique par combustible était la suivante : gaz naturel (56%), charbon (13%), hydraulique (17%), nucléaire (5%), éolien (4%), autres non renouvelables (3%), et autres renouvelables (2%). Notons que les centrales nucléaires d'Engie sont toutes installées hors de France.

Engie envisage de se développer dans les pays de l'hémisphère Sud qui connaissent une croissance soutenue de la demande en énergie, comme l'Asie, le Moyen-Orient ou l'Amérique du Sud ou qui disposent d'infrastructures anciennes à faire évoluer. Concernant les pays matures, le groupe a défini trois priorités : le développement des solutions et des services d'efficacité énergétique, l'innovation par la digitalisation et le développement des énergies renouvelables.

Dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, le groupe s'est fixé plusieurs objectifs d'ici 2030 : assurer l'accès pour tous aux services énergétiques modernes, doubler

³¹⁵ D'après le classement mondial des entreprises Global 500 publié en 2015 par le magazine Fortune.

³¹⁶ Les actifs dépréciés concernent principalement des centrales thermiques et des sites de stockage de gaz.

³¹⁷ Les données relatives à l'intensité des dépenses de R&D et à l'intensité carbone sont présentées dans le Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

son taux d'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau mondial, pour atteindre 40%, et doubler la part des énergies renouvelables dans son mix énergétique, notamment au travers de l'augmentation de ses capacités hydro-électriques de 1 500 MW. La feuille de route prévoit également une réduction de 10 % de son intensité carbone d'ici 2020.

Le développement éolien fait partie des priorités d'Engie. Dans l'éolien terrestre, le groupe est aujourd'hui leader en France avec plus de 1 250 MW installés en 2014 et troisième producteur en Europe. Pour cela, Engie a procédé à une série d'acquisitions ou de prises de capital : en 2006, il a pris une participation de 49% dans la société Maia Eolis et, en 2007, une participation de 53% dans la Compagnie du Vent. Notons également qu'Engie a été sélectionné par l'Etat français pour exploiter des éoliennes en mer sur les sites du Tréport, de l'île d'Yeu et de Noirmoutier. En 2015, Engie a, de surcroît, procédé au rachat de Solaire Direct, acteur de premier rang en France et en Europe dans la filière photovoltaïque.

Engie investit chaque année à hauteur de 90 M€ dans la R&D, sur les trois métiers du groupe (électricité, gaz et services énergétiques), répartis sur cinq pôles distincts : Ville et bâtiment de demain, Smart energy & environnement, Energies renouvelables, captage et stockage du CO₂, GNL offshore et chaînes gazières du futur.

Ainsi, Engie accompagne des villes comme Forbach dans leur transition énergétique, au travers de l'installation de centrales de cogénération biomasse pour l'alimentation du réseau de chaleur urbain. De même à Bordeaux et à Nice, où Engie développe un "démonstrateur" qui permettra de tester, en un même lieu, une large gamme de technologies innovantes (production et distribution de froid, récupération et réutilisation de l'eau de pluie, collecte et valorisation des déchets, location de véhicules électriques). De plus, dans le cadre des expérimentations menées dans le domaine des villes intelligentes, Engie est partenaire du projet GreenLys, lancé en juin 2012, qui procède à la mise en place, sur quatre ans, de deux démonstrateurs à taille réelle à Lyon et à Grenoble ; des solutions de pilotage à distance des consommations électriques, des unités de mini et micro-cogénération ainsi que des véhicules électriques seront déployés. Autant de technologies qui devraient multiplier la performance énergétique des bâtiments : leur combinaison permettra à terme de gérer plus efficacement les consommations, notamment, grâce à l'effacement diffus piloté à distance par un agrégateur ou au stockage de l'électricité via les batteries des véhicules électriques.

Engie est actif sur le captage et le stockage du carbone. En collaboration avec plusieurs industriels et organismes de recherche français et européens, il a lancé en 2010 le projet de transport et de stockage de CO₂ «France Nord». Il est également partie prenante du projet ROAD, sur le site de Maasvlakte à Rotterdam, qui, avec pour ambition de capter 1,1 Mt CO₂ et de le stocker dans un réservoir de gaz situé en mer du Nord, est l'un des premiers projets à mettre en œuvre, à grande échelle, l'ensemble de la chaîne CCS : captage, transport et stockage du carbone.

Notons qu'Engie est également présent dans le domaine de l'hydrogène. Il a remporté le prix spécial du jury multi-énergies au congrès Smart Grid de Paris pour le projet collaboratif GRHYD, dont l'objectif est de combiner à l'échelle d'un quartier la production d'électricité à partir d'éoliennes, son stockage sous forme d'hydrogène, et l'injection ultérieure de

l'hydrogène produit dans des réseaux de gaz naturel. Il participe également au projet HIT avec les acteurs de la filière hydrogène afin d'élaborer, sur la base de données partagées, des scénarios de déploiements synchronisés de véhicules et de stations hydrogène, avec pour but de calculer les bénéfices et les coûts de cette transition ; ainsi qu'au projet HyWay, avec Cofely Services, qui cherche à industrialiser des kits hydrogène intégrables aux Kangoo ZE et leur confère une autonomie de 300 km en cycle urbain. Il s'agira, ensuite, d'exploiter en service régulier, pendant 18 mois minimum, 50 véhicules Kangoo ZE hybrides en région Rhône-Alpes grâce à la mise en place de deux stations de distribution d'hydrogène à Lyon et Grenoble. Toujours à l'échelle des quartiers, Engie teste, avec les projets Smart ZAE et Smart Campus, des solutions de gestion de micro-réseaux qui imposent de répondre simultanément aux défis de production renouvelable intermittente, du stockage d'électricité et de gestion des nouveaux usages (véhicules électriques). Avec pour objectif principal de gérer l'équilibre offre-demande locale pour limiter autant que possible les coûts de connexion au réseau de distribution ou au transport.

Enfin, Engie a lancé en mai 2014 le fonds d'investissement Engie New Ventures, doté de 100 M€, pour accompagner des start up innovantes dans le domaine des technologies énergétiques. Ce fonds est destiné à prendre des participations minoritaires dans des start up qui interviennent sur les activités du groupe, en leur offrant double levier : financier, grâce à l'investissement, et opérationnel, auprès des filiales du groupe.

Pour faire face aux défis de la transition énergétique mais aussi pour en saisir toutes les opportunités, Engie s'est engagé sur la voie de la refonte de son mix énergétique en octroyant une place prépondérante aux EnR, surtout les plus compétitives comme l'éolien ou l'hydro-électricité. Le groupe voit aussi dans la transition énergétique de nombreuses opportunités dans les réseaux et la mobilité, en introduisant les technologies de l'information. Et a perçu le rôle du numérique dans les transformations de la chaîne de valeur de l'énergie, de la production à la relation client.

2.5.2 Stratégie d'innovation

Dans la mesure où Engie a été contraint de déprécier ses actifs en raison du manque de compétitivité de ses centrales thermiques, il sera intéressant d'identifier s'il se positionne plutôt sur les technologies de substitution ou d'addition. Et au vu de son mix électrique et de son portefeuille d'activité diversifiés, de vérifier si les priorités de recherche formulées (Villes connectés, EnR et CCS) se répercutent sur son engagement dans les domaines technologiques étudiés. Ainsi que d'observer s'il s'investit sur l'ensemble ou seulement une partie.

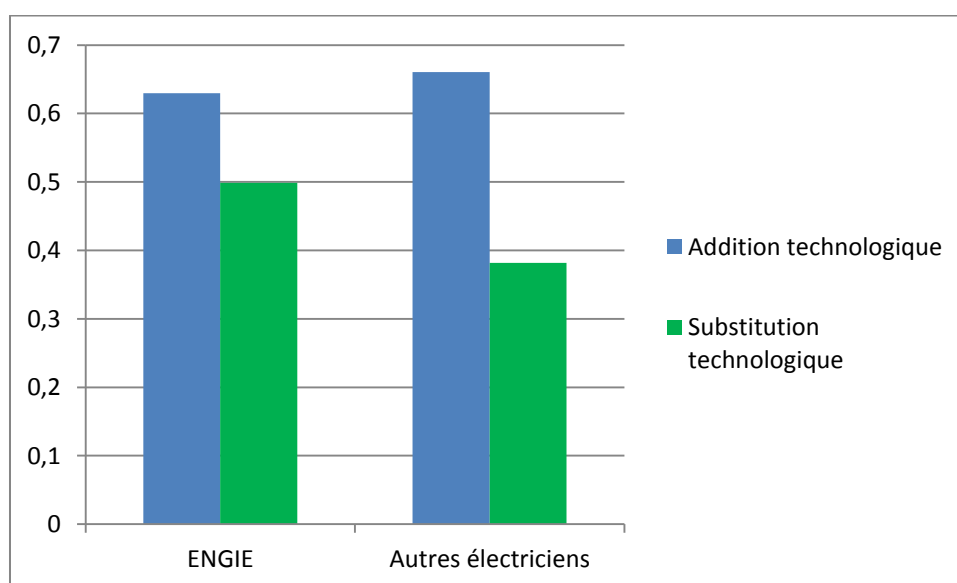
Concernant sa démarche d'acquisition des connaissances, l'implication d'Engie dans les énergies renouvelables, qui s'est réalisée par prise de participation successive, pose la question du mode de développement de l'innovation, en interne, ou en tant qu'adopteur. Et au regard des ressources significatives qu'il consacre pour soutenir les jeunes entreprises innovantes, d'apprécier quelle résonance se fait en termes de collaboration avec les nouveaux entrants dans le cadre des projets.

2.5.2.1 Analyse de la stratégie technologique

Engie est engagé dans 10 projets du 7^{ème} PCRD dont seulement 60% concernent les technologies étudiées³¹⁸, soit le ratio le plus faible de l'ensemble des électriciens. Ce qui signifie en filigrane qu'Engie est l'électricien qui consacre la part la plus importante de son portefeuille de projets à des technologies non énergétiques. Notons, en outre, qu'Engie n'est jamais coordinateur des projets auquel il participe. Le coût total cumulé de ces projets est de 88 M€, avec un financement de la Commission européenne de 49 M€. Même tendance concernant les brevets : sur les 122 déposés entre 2007 et 2013, 87% ne sont pas des brevets verts³¹⁹, une nouvelle fois la proportion la plus élevée des électriciens. Les domaines technologiques étudiés en comprennent seulement 6%, soit seulement 7 sur la période considérée. Des premiers éléments qui incitent à traiter avec précaution les résultats de l'étude des brevets et des projets.

Tout d'abord on constate (Figure 92) qu'Engie oriente sa stratégie préférentiellement vers les technologies d'addition plutôt que de substitution technologique, bien que son niveau d'engagement dans ces dernières soit comparativement plus élevé que celui des autres électriciens.

Figure 92 : Comparaison de l'intensité³²⁰ de l'engagement d'Engie dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui des autres électriciens



Source : auteur

Les trois principaux domaines technologiques explorés par Engie sont les suivants : les smart grids, l'hydrogène et le CCS. Deux éléments sont d'ores et déjà notables. Premièrement, il est,

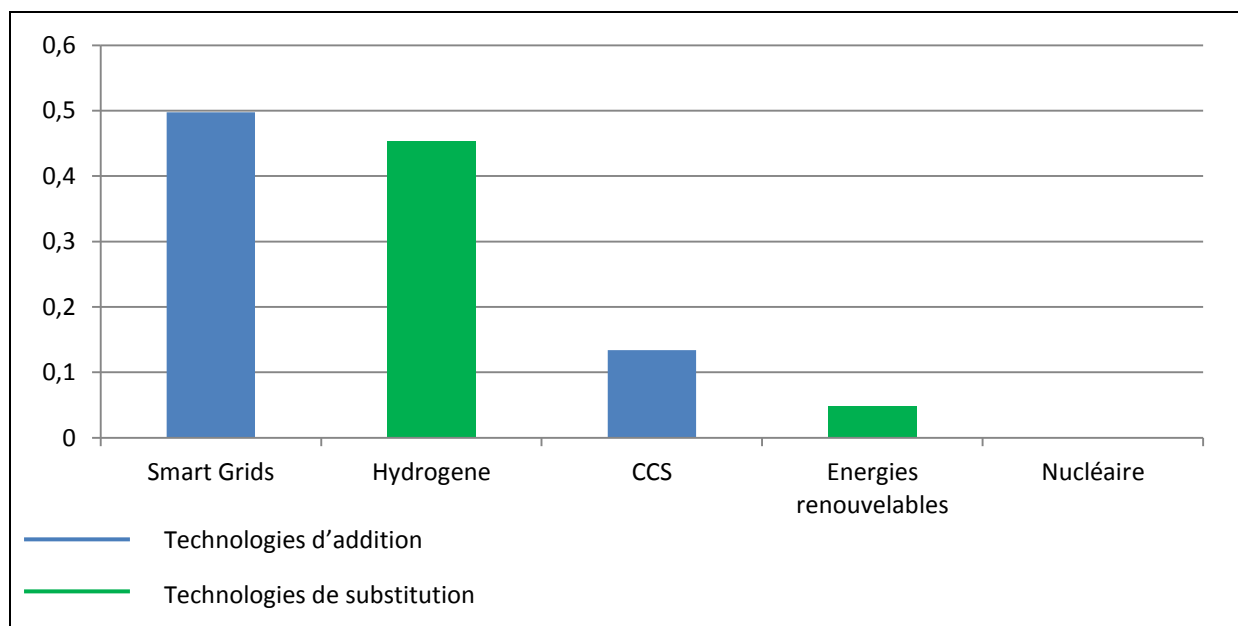
³¹⁸ CCS, énergies renouvelables, fission nucléaire, hydrogène et smartgrids.

³¹⁹ Selon l'Inventaire vert de l'OMPI.

³²⁰ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

avec E.ON³²¹, le seul électricien qui n'explore pas en priorité les deux technologies les plus systémiques, (smart grids et énergies renouvelables) : son engagement sur les énergies renouvelables, est, en comparaison de celui des autres électriciens, singulièrement limité. Deuxièmement, il est le seul à placer l'hydrogène parmi les trois domaines technologiques les plus explorés.

Figure 93 : Intensité³²² de l'engagement d'Engie à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

Engie est tout particulièrement actif dans le domaine de l'hydrogène, où 5 brevets ont été déposés (il est le deuxième déposant dans ce secteur derrière EDF³²³), soit près des deux tiers de son portefeuille sur la période. Notons que sur ce sujet, Engie ne participe pourtant qu'à un seul projet, ENE.FIELD qui, doté d'un budget de 53 M€, est le plus onéreux des 126 projets considérés. Ce projet vise à installer 1 000 piles à combustible de cogénération dans les habitations de 12 Etats membres, afin de bénéficier d'effets d'apprentissage sur les enjeux de l'installation d'un parc de piles à combustible. Un déploiement d'envergure qui permettra d'industrialiser le processus de production et d'en réduire les coûts. La position d'Engie dans ce domaine est à comprendre sous l'angle de sa position de premier importateur européen de gaz, et donc de sa volonté de développer les techniques de « Power to gas » et se révèle cohérent avec ses priorités stratégiques, dont les chaînes gazières du futur constituent l'un des cinq piliers.

Dans le domaine du CCS, Engie a déposé un brevet et participe uniquement au projet CESAR qui porte sur l'amélioration de la technique de captage du CO₂ par post-combustion. Au regard de sa taille, de sa dépendance aux énergies fossiles et du caractère stratégique du CCS, c'est un chiffre plutôt dérisoire, et d'autant plus étonnant vu la situation de ses actifs

³²¹ Cf. Chapitre V, section [2.4.2.1 Analyse de la stratégie technologique](#) d'E.ON.

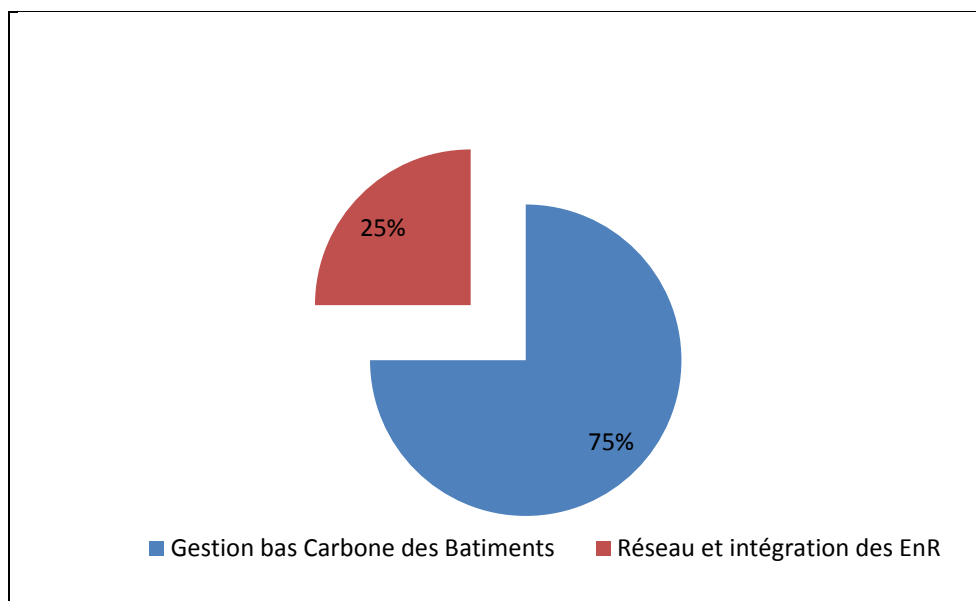
³²² Cf. Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

³²³ Cf. Chapitre V, section [2.2.2.1 Analyse de la stratégie technologique](#) d'EDF.

« thermiques » dont le CCS devrait participer à limiter la dépréciation si le prix du carbone venait à s'élever.

En ce qui concerne les smart grids, Engie a déposé 2 brevets et participe à 4 projets. Le principal segment exploré est celui la gestion bas carbone des bâtiments (3 projets), ce qui s'inscrit dans sa stratégie d'innovation, fondé en partie sur la « ville connectée ». Engie est notamment engagé dans les projets Performer et Holisteeec qui visent, en s'appuyant sur des approches différentes, à mettre en place des outils numériques susceptibles de mesurer la performance énergétique des bâtiments.

Figure 94 : Répartition des projets d' Engie dans le domaine des smart grids



Source : auteur à partir de Cordis

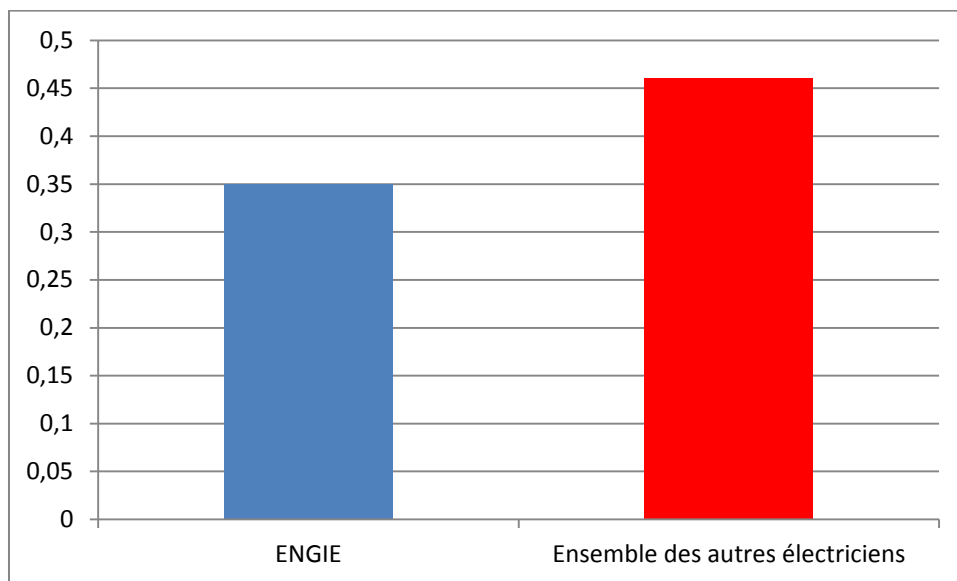
En outre, Engie se démarque des autres électriciens par sa participation, somme toute assez limitée, dans le domaine des énergies renouvelables, pourtant revendiqué comme un axe stratégique de sa politique d'innovation. Il ne participe à aucun projet collaboratif sur ce sujet et n'a déposé sur la période 2007 – 2013 qu'un seul brevet, relatif au solaire photovoltaïque. Si ce résultat doit être traité avec précaution, au regard de sa faible participation sur l'ensemble des domaines, on peut toutefois le rapprocher de la manière dont il s'est investi dans ce secteur, par une prise de participation successive – ce qui l'a dispensé de développer de nouvelles connaissances en la matière de façon autonome.

On notera, enfin, que, conformément à la stratégie d'innovation formulée, il est absent du domaine du nucléaire.

2.5.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des nouvelles connaissances

Engie s'inscrit dans une démarche d'ouverture parmi les moins marquées de l'ensemble des électriciens considérés, ce qui atteste de son peu d'appétence à se coordonner avec les autres parties prenantes pour développer l'innovation bas carbone.

Figure 95 : Comparaison du niveau d'ouverture³²⁴ de la démarche d'acquisition des connaissances d'Engie avec celui des autres électriciens

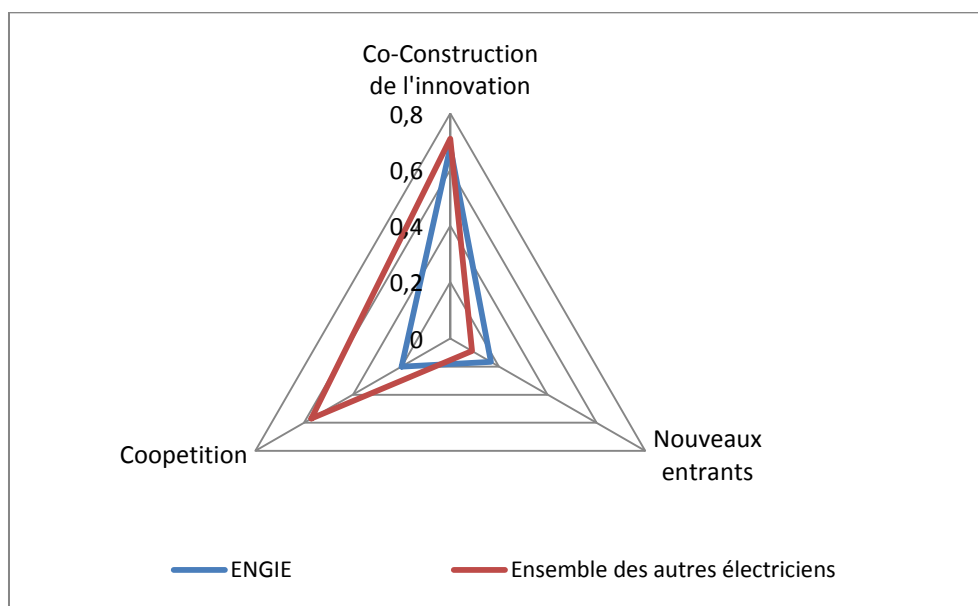


Source : auteur

Le niveau bas de son indice d'ouverture est, en premier lieu, la résultante de son niveau de coopération particulièrement faible, révélateur de son peu d'intérêt pour collaborer avec ses concurrents.

³²⁴ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#)

Figure 96 : Comparaison d'Engie avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus³²⁵ pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

Sur les trois critères de mesure retenus, on remarquera d'abord, qu'en valeur absolue, le niveau de « Co-construction de l'innovation » d'Engie est supérieur à 0,5, soit plus proche du modèle d'adopteur d'innovation que de générateur³²⁶. Ce niveau est comparable à celui des autres électriciens et ne constitue pas, en soi, un critère distinctif, et ne pèse donc pas sur le profil de sa démarche d'ouverture. En revanche, il est tout à fait notable qu'Engie s'engage timidement dans une démarche de coopération, révélatrice de sa vigilance quant à la circulation des connaissances qui s'opère entre compétiteurs lors des projets collaboratifs. Seul le projet CESAR, relatif au CCS, se fait en collaboration avec d'autres électriciens (en l'occurrence RWE et E.ON). Néanmoins, Engie est caractérisé par une proportion de projets orientés « Nouveaux entrants » supérieur à l'ensemble des électriciens : du fait de sa présence dans la gestion bas carbone des bâtiments qui, comme nous l'avons vu dans la section précédente³²⁷, donne mécaniquement lieu à des collaborations avec les adjacents (en particulier les acteurs de la construction).

³²⁵ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#)

³²⁶ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui innovent en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations dans l'introduction des innovations environnementales.](#)

³²⁷ Cf Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grids.](#)

2.5.3 Conclusion

Il est, avant tout, important de rappeler qu'Engie fait partie des électriciens pour lesquels les domaines technologiques étudiés sont explorés dans les proportions les plus faibles³²⁸. Il est donc nécessaire d'avancer avec précaution dans les interprétations qui peuvent se faire jour suite à l'analyse des brevets et des projets.

Alors que les dépréciations d'actifs réalisées en 2014 par Engie nécessitent, en théorie, de mettre en place une politique de substitution technologique, il apparaît, à la lumière des brevets et des projets, que sa stratégie est davantage orientée, à l'instar de celle de la plupart des électriciens, vers les innovations relatives à l'addition technologique. Cependant ses priorités technologiques se démarquent sur les deux points suivants : premièrement, les innovations les plus systémiques (énergies renouvelables et smart grids) ne constituent pas les deux domaines explorés en priorité, du fait de son faible engagement dans les énergies renouvelables à travers les projets et les brevets et ce, alors même qu'il revendique ce domaine comme un axe majeur de sa stratégie d'innovation. Deuxièmement, Engie est l'électricien qui s'investit le plus dans l'hydrogène. Un constat en ligne avec les priorités formulées par le groupe, et compréhensible au vu de l'importance du gaz dans ses activités. On peut, enfin, s'étonner de la faible part consacrée au CCS, en contradiction avec l'importance des énergies fossiles dans son mix énergétique, et de la récente dépréciation d'une partie de ses actifs.

En outre, il apparaît que comparativement à autres électriciens étudiés, l'acquisition des connaissances d'Engie s'inscrit dans une démarche plutôt fermée. Si le niveau de l'indicateur de « Co-construction » est comparable à celui de l'ensemble de ses pairs, et tendrait à le classer plutôt dans la catégorie des adopteurs d'innovation, on remarque une vraie réticence à collaborer avec ses compétiteurs.

Enfin, il semblerait que les brevets ne soient pas partie prenante de sa stratégie compétitive : c'est ce que révèle le nombre particulièrement bas de brevets déposés dans les EnR alors même que la présence d'Engie à l'international est particulièrement axée sur les énergies renouvelables.

³²⁸ Ce constat est particulièrement notable pour les brevets. D'une part, on observe que les brevets déposés dans les domaines technologiques étudiés ne représentent que 8% des brevets total déposés. D'autre part, les brevets verts « non étudiés » représentent 19% soit le score le plus élevé des électriciens étudiés.

2.6 IBERDROLA

2.6.1 Les enjeux de la transition énergétique

L'histoire d'Iberdrola en matière de production d'électricité à faible intensité carbone a commencé en 1901 avec la création de Hidroelectrica Iberica. Un siècle plus tard, l'électricien espagnol est lancé dans une stratégie de développement ambitieuse, tout en renforçant son engagement dans les technologies bas carbone : en dépit du ralentissement de la croissance des EnR qui s'est traduite pour l'énergéticien espagnol par une perte de 200 M€ en 2013, Iberdrola est profondément impliqué dans la transition énergétique. Leader mondial dans le secteur de l'éolien, il se démarque par sa faible intensité carbone³²⁹ et apparaît comme l'un des électriciens qui investit la part de son chiffre d'affaires la plus élevée dans l'innovation³³⁰, alors même que l'Etat espagnol est absent de son capital.

Né en 1992 de la fusion entre Iberduero et Hidroeléctrica Española, Iberdrola est le premier groupe énergétique espagnol, avec un chiffre d'affaires de 31 Md€ en 2015, deuxième producteur d'électricité en Espagne derrière Endesa, et numéro un de l'éolien mondial. Ses principales activités sont la production et la distribution d'électricité et de gaz. Le groupe est aujourd'hui présent dans près de 40 pays dans le monde - en particulier en Espagne, en Amérique latine, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis - avec un parc global de production électrique d'une puissance installée de près de 46,5 GW (contre 16 GW en 2000) dont 14,7 GW d'origine renouvelable (hors hydraulique), soit environ 32% de ses capacités. Hors centrales hydrauliques, les parcs éoliens - dont Iberdrola assure le développement, la construction et l'exploitation - fournissent la quasi-totalité de l'électricité d'origine renouvelable du groupe. En raison de la libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz, Iberdrola a cédé ses infrastructures de transport à Red Eléctrica España, mais conserve des activités de distribution de l'électricité en Espagne.

Au milieu des années 1990, Iberdrola contrôle près de 40% des capacités de production électrique du pays (en majorité hydraulique et nucléaire). Alors que la directive européenne de 1996 entérine l'ouverture du marché électrique européen, Iberdrola se développe en Amérique latine. Dès le début des années 2000, le groupe décide de diversifier son mix de production vers les énergies renouvelables et le gaz naturel et d'intensifier son programme de développement international. Celui-ci se concrétise avec les acquisitions en 2007 de Scottish Power, quatrième plus grand fournisseur d'énergie au Royaume-Uni, en 2008 d'Energy East aux Etats-Unis (rebaptisée depuis Iberdrola USA) et en 2011 d'Elektro au Brésil. Près de 90% de la puissance éolienne installée du groupe se répartit entre l'Espagne (5,5 GW), les Etats-Unis (5,1 GW) et le Royaume-Uni (1 GW).

En 2015, le mix électrique d'Iberdrola (46,5 GW) se répartit à hauteur de 32% pour les EnR (hors hydraulique), 24% pour l'hydraulique, 27% pour les centrales à cycle combiné, 7% pour

³²⁹ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

³³⁰ Sur la période 2007-2013, l'intensité R&D d'Iberdrola atteignait 0,38%, soit un chiffre supérieur à la plupart des électriciens.

les centrales à charbon, 7% pour le nucléaire et 3% pour les centrales de cogénération. Iberdrola assure sa présence dans le monde à travers ses différentes filiales : Iberdrola Portugal, Scottish Power, Iberdrola USA, Elektro (Brésil), Electropaz (Bolivie)... qui mènent de nombreux projets pour le compte du groupe. En Espagne et au Portugal, Iberdrola souhaite poursuivre le développement de ses infrastructures de distribution (projets de réseaux intelligents à Castellón et à Bilbao) et de son parc hydro-électrique. Dans le reste de l'Europe, l'activité du groupe est essentiellement tournée vers le développement de son parc éolien (par exemple, avec la construction d'un parc de 1500 MW en Roumanie, qui devrait s'achever 2017).

Aujourd'hui, Iberdrola est confronté, comme la plupart des électriciens européens à une capacité de production excédentaire résultant de l'injection massive d'électricité d'origine renouvelable prioritaire sur le réseau et d'une chute de la demande. Face au ralentissement de la croissance des EnR en Espagne, Iberdrola réoriente sa stratégie en se tournant vers des marchés plus porteurs, comme ceux de l'éolien offshore dans les pays nordiques, en Grande-Bretagne (il est en charge de la construction de Vattenfall, l'un des parcs les plus importants du monde), et en France, où Iberdrola s'est associé, dans le cadre de l'appel d'offres sur l'éolien offshore, à plusieurs entreprises françaises (Areva, Neoen Marine et Technip) au sein du consortium « Ailes Marines SAS », sélectionné pour exploiter des éoliennes offshore dans la baie de Saint-Brieuc. Sur un total de 8,9 Mds EUR d'investissements prévus sur la période 2014-2016, le groupe espagnol entend investir 85% sur des marchés internationaux, notamment dans des fermes éoliennes offshore en mer du Nord ; et s'est récemment fixé un nouvel objectif environnemental de réduction de l'intensité de ses émissions CO₂ sous le niveau des 150 gCO₂/KWh en 2030, soit 50% de moins que ses émissions de 2007.

Un budget moyen de 150 M€ par an a été consacré à l'innovation entre 2007 et 2013, soit une intensité R&D de 0,38%, qui place le groupe en deuxième position en termes de chiffre d'affaires dédié à ce secteur. La répartition du budget de R&D met en évidence l'importance accordée aux réseaux (au premier rang), suivis de la génération (qui inclut la « génération propre » et l'efficacité énergétique) et des énergies renouvelables. Les axes de recherche prioritaires portent sur les réseaux intelligents (distribution, intégration, gestion de l'énergie, clients), la génération bas carbone, le service qualité, les nouveaux matériels et équipements, la mobilité électrique, le stockage de l'énergie. Iberdrola est reconnu comme l'énergéticien le plus innovant en Espagne et occupe le 4^{ème} rang à l'échelle européenne selon le R&D scoreboard de la Commission européenne.

En outre, Iberdrola est le seul électricien du périmètre considéré à publier un rapport d'innovation. L'analyse du plus récent (années 2011 à 2013) est évocatrice ; il en ressort qu'Iberdrola a développé un modèle d'innovation ouvert, décliné à tous les métiers du groupe et concrétisé par des coopérations étroites avec différentes parties prenantes : entreprises, fournisseurs, clients, partenaires, centres de recherche, et institutions. Notons, également, l'importance du nombre de projets conduits (160) : 19 concernent les énergies renouvelables, dont 7 pour les énergies marines et la technologie solaire (elle-même répartie entre photovoltaïque et électricité concentrée), et 4 projets de fermes éoliennes offshore, puis le

nucléaire (12), les smart grids (9 sur les 30 relatifs aux réseaux), le CCS (3) et l'hydrogène (1).

Le groupe a construit au Qatar un centre consacré à la recherche sur les smart grids. En parallèle, un protocole d'accord a été signé avec Siemens pour former une alliance destinée à développer des infrastructures de réseaux intelligents au Qatar et au Moyen-Orient. En termes de mobilité électrique, Iberdrola a participé à de nombreux projets en lien avec des institutions et administrations publiques, principalement des municipalités, ainsi qu'à des programmes de R&D. Ces partenariats ont été l'occasion d'accélérer son apprentissage dans le domaine des systèmes et des technologies de charge et de conclure de nouveaux accords avec des prestataires et des acteurs de la chaîne de valeur des circuits de charge. Le groupe a également lancé le projet STAR (Gestion à distance des réseaux et systèmes d'automatisation développée par Sistemas de Telegestión y Automatización de la Red en espagnol), une initiative ambitieuse dont l'objectif est de transformer la technologie dans le secteur des smart grids. Castellón a été le premier endroit retenu pour implanter ce projet.

Par ailleurs, Iberdrola a créé, dès 2008³³¹ Perseo, un fonds de capital amorçage destiné aux jeunes entreprises innovantes dans les technologies bas carbone (énergie marine, énergie solaire, applications industrielles du carbone...). Un financement de 25 M€ sur un total de 70 M€ a déjà été débloqué au bénéfice de cinq entreprises, principalement porteuses de projets dans les EnR (Oceantec, HammerfestStrom, Morgan Solar), les énergies distribuées, et les technologies d'exploitation et de maintenance des réseaux.

Pour le groupe espagnol, la transformation de son modèle énergétique en un modèle durable et efficace exigera de maintenir son leadership dans le secteur de l'éolien en dépit d'une politique de subventionnement beaucoup moins favorable (en Espagne en particulier), de confirmer son engagement pionnier dans les technologies solaires thermiques, (et plus généralement de renforcer ses investissements dans les technologies bas carbone) et de lancer de nouveaux produits et services répondant aux besoins des consommateurs (efficacité électrique, véhicules électriques, réseaux intelligents, production décentralisée...). Iberdrola revendique un modèle d'innovation ouverte et partenariale, s'appuyant sur des interactions permanentes avec les acteurs du secteur électrique et, plus largement, sur l'ensemble des parties prenantes à la transition énergétique.

2.6.2 Stratégie d'innovation

Iberdrola fait aujourd'hui figure de « bon élève » de la transition énergétique. Il dispose d'une intensité carbone parmi les plus faibles des électriciens européens, ce qui s'explique par la part particulièrement élevée des énergies renouvelables dans son mix électrique. Notamment grâce au soutien de l'Espagne dans l'éolien terrestre, l'électricien s'est très tôt positionné sur ce domaine dont il est aujourd'hui le leader mondial. Avec 0,34% de son chiffre d'affaires

³³¹ Ce qui place Iberdrola en position de précurseur parmi les électriciens considérés dans le lancement de fonds Corporate Venture.

dédié à l'innovation, Iberdrola est l'un des électriciens les plus engagés dans la R&D. Il présente un processus d'innovation nourri par des collaborations avec l'ensemble de l'écosystème. Iberdrola est exemplaire en termes de transparence sur ses activités de recherche, puisqu'il est le seul à publier un « rapport d'innovation ».

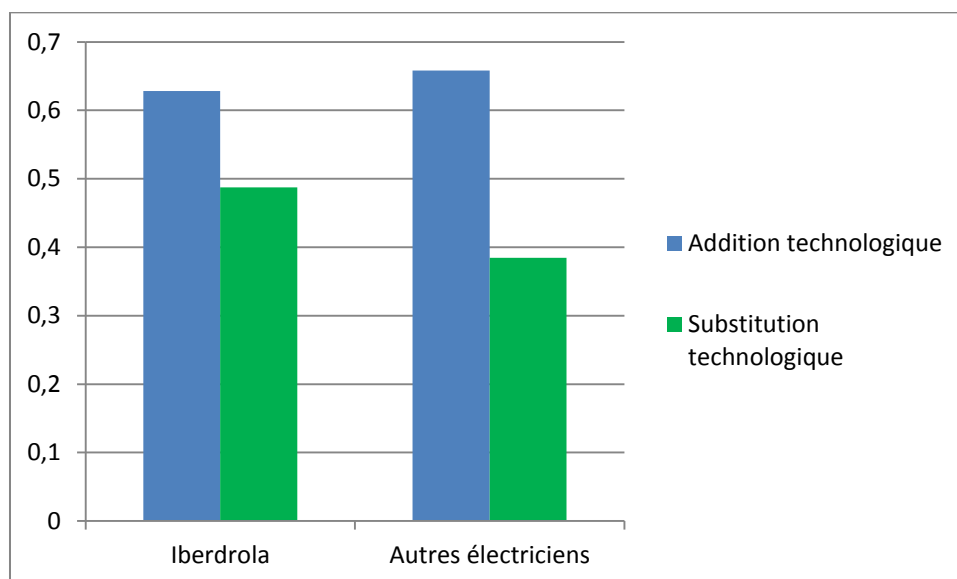
L'analyse de la stratégie d'innovation sera articulée de la façon suivante. Tout d'abord, nous vérifierons si l'analyse des projets et des brevets confirme la présence d'Iberdrola dans les EnR et le positionne prioritairement vers les technologies de substitution. Puis, dans quelle mesure sa stratégie technologique est alignée avec celle présentée par le rapport d'innovation. Enfin, si les modalités d'acquisition des connaissances d'Iberdrola s'inscrivent dans une démarche ouverte, comme cela est revendiqué dans son rapport.

2.6.2.1 Analyse de la stratégie technologique

Iberdrola est engagé dans 18 projets du 7^{ème} PCRD dont 17 concernent les technologies étudiées, soit un ratio supérieur à celui de l'ensemble des électriciens et révélateur des enjeux clé qu'ils représentent. Leur coût cumulé est de 195 M€ et le financement de la Commission européenne de 111 M€. Entre 2007 et 2013, seulement quatre brevets ont été déposés par Iberdrola, qui présentent la particularité de concerner exclusivement des technologies vertes (et trois d'entre eux les technologies étudiées).

L'analyse des brevets et des projets montre qu'Iberdrola privilégie les technologies d'addition à celles de substitution, bien qu'il reste plus présent que l'ensemble des électriciens sur ces dernières.

Figure 97 : Comparaison de l'intensité³³² de l'engagement d'Iberdrola dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui des autres électriciens

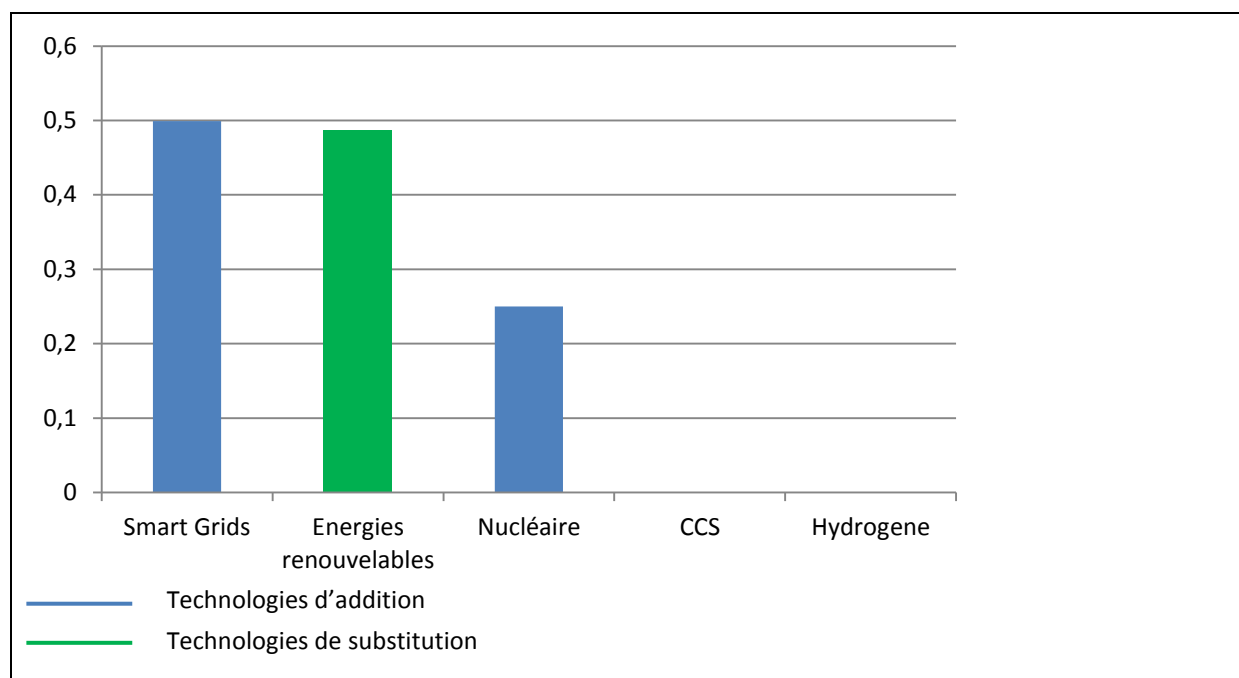


Source auteur

Iberdrola est caractérisé par le plus faible nombre de brevets déposés et par une participation relativement peu importante à des projets. En outre, il se distingue par une stratégie concentrée sur seulement trois des cinq domaines technologiques étudiés, et fait l'impasse sur le CCS et l'hydrogène, constat surprenant au regard du volume significatif des ressources consacrées aux activités de R&D.

³³² La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

Figure 98 : Intensité³³³ de l'engagement d'Iberdrola à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

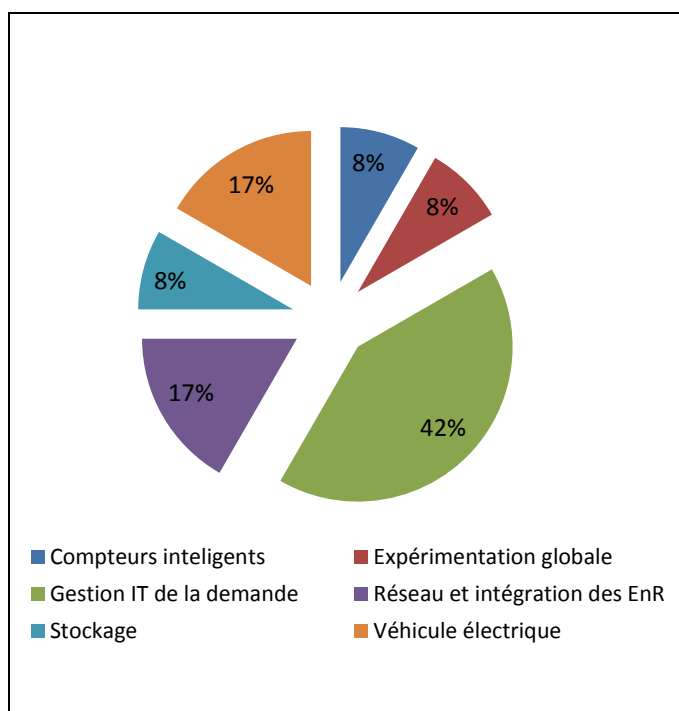
A l'aune de l'analyse des brevets et des projets, les trois domaines technologiques explorés en priorité par Iberdrola - les smart grids, les énergies renouvelables et le nucléaire - s'inscrivent en conformité avec les orientations exprimées dans son rapport d'innovation. Et à l'image de ce qui a été observé pour le secteur électrique³³⁴, les domaines les plus systémiques (smart grids et énergies renouvelables) sont, là encore, privilégiés.

Avec un total de 12 projets (soit 70% du portefeuille), dont 2 en tant que coordinateur, Iberdrola se positionne principalement dans le domaine des smart grids (notons, par ailleurs, qu'aucun brevet n'a été déposé dans ce domaine). La répartition par segment (Figure 99) indique que l'électricien est présent sur chacun d'entre eux, même si on relève une participation nettement plus conséquente sur la gestion IT de la demande et, dans une moindre mesure, sur les réseaux et intégration des EnR. Si les enjeux des villes connectées (gestion bas carbone des bâtiments) et les nouveaux usages de l'électricité (véhicules électriques) sont également représentés, on peut comprendre que cette répartition répond, ici, avant tout, à son besoin d'intégrer les énergies renouvelables, qui découle naturellement de sa position de leader de l'éolien.

³³³ L'intensité est mesurée à travers un score tenant compte de la part des brevets et des projets d'Iberdrola dans chacune des technologies par rapport au nombre total de brevets déposés et au nombre total de projets conduits par l'ensemble des électriciens étudiés. Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

³³⁴ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

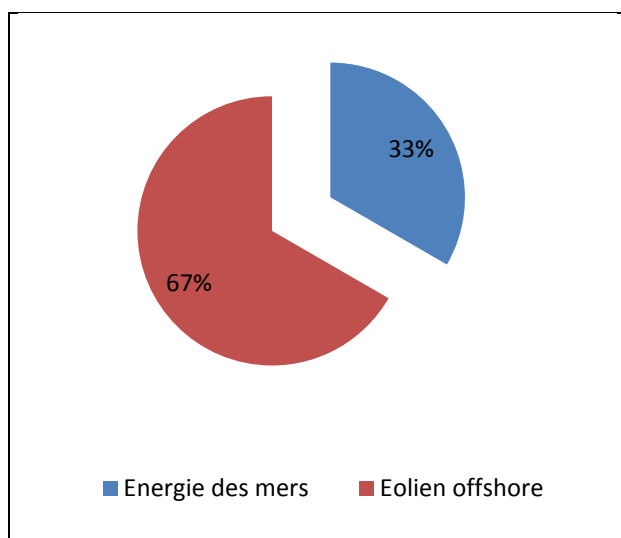
Figure 99 : Répartition des projets smart grids menés lors du 7^{ème} PCRD



Source : Auteur à partir de Cordis

Les énergies renouvelables se classent au deuxième rang des technologies prioritaires. Les segments qui ressortent de l'analyse des projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD, ainsi que du rapport d'innovation, sont ceux des énergies des mers et de l'éolien offshore. L'importance accordée à l'éolien offshore s'explique par la croissance soutenue des capacités installées qu'Iberdrola connaît en la matière et le rôle de relais de croissance naturel qu'il peut jouer à l'égard de l'éolien terrestre, l'activité phare d'Iberdrola. Son intérêt pour les énergies des mers peut quant à lui s'expliquer par sa présence aux Etats-Unis (1^{er} domaine maritime mondial) et au Royaume-Uni qui, en raison de la configuration de son relief, investit massivement dans ce secteur. Notons que le seul brevet déposé par Iberdrola concerne le solaire à concentration - domaine qui n'appartient pas à ses priorités stratégiques - si l'on en croit son rapport d'innovation. Enfin, on relèvera que, bien qu'Iberdrola soit leader dans le domaine de l'éolien, son avantage compétitif ne se révèle pas par le nombre de brevets déposés.

Figure 100 : Répartition des projets d'Iberdrola dans le domaine des énergies renouvelables



Source : auteur à partir de Cordis

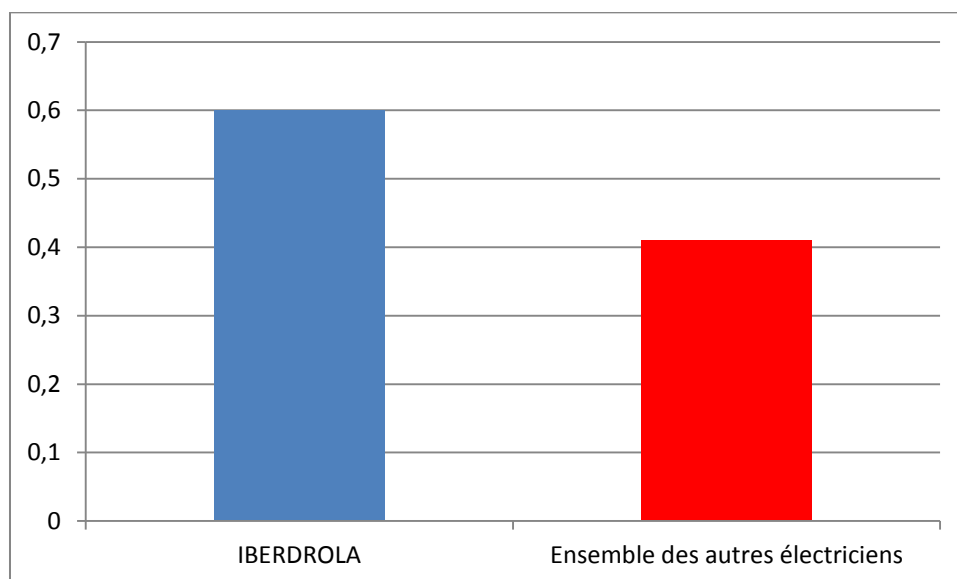
Ensuite, avec une part du portefeuille de brevets de 33% et une part du portefeuille de projets de 17%, le nucléaire représente le troisième domaine exploré par Iberdrola. Un investissement compréhensible dans la mesure où, cette technologie s'élevant à 5% de ses capacités installées, est amenée à jouer un rôle clé dans la transition énergétique.

Dernier constat, l'impasse faite sur le CCS et l'hydrogène, conformément à ce qu'annoncé dans le rapport d'innovation (qui faisait état d'un seul projet dans l'hydrogène et de seulement trois dans le CCS). Une absence, qui, concernant le CCS, confirme la politique mise en avant, laquelle vise davantage à substituer ses capacités par de nouvelles moins émettrices, plutôt que d'améliorer les performances environnementales de centrales déjà opérationnelles. Il est, d'ailleurs, tout-à-fait notable qu'Iberdrola soit le seul électricien à réaliser une impasse technologique dans ce domaine.

2.6.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des connaissances

Iberdrola est l'électricien dont l'indice d'ouverture est le plus élevé des électriciens étudiés, ce qui confirme ce qu'exprimé dans le rapport d'innovation, à savoir une logique d'innovation ouverte.

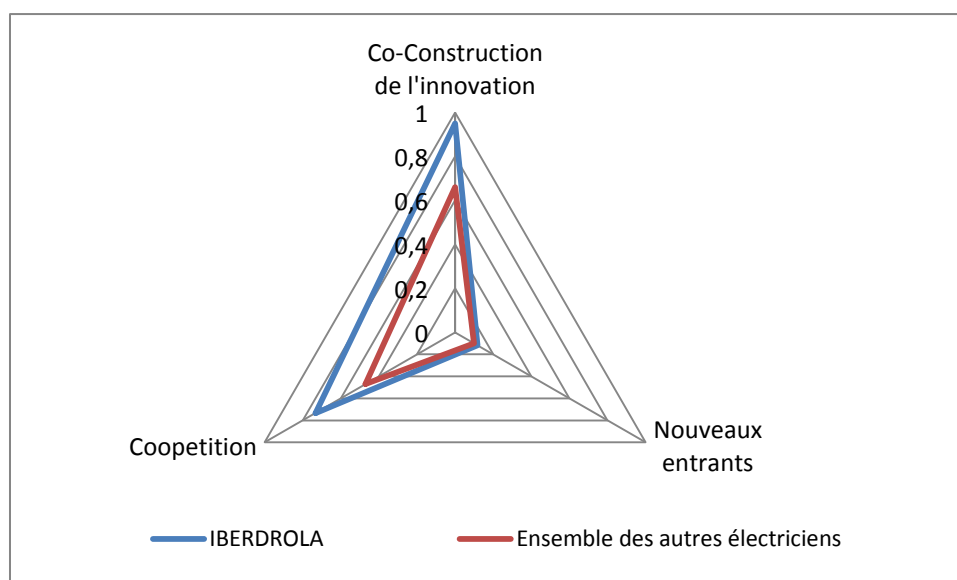
Figure 101 : Comparaison du niveau d'ouverture³³⁵ de la démarche d'acquisition des connaissances d'Iberdrola avec celui des autres électriciens



Source : auteur

Le niveau élevé de l'indice d'ouverture s'explique, en premier lieu, par des démarches de co-construction de l'innovation et de coopétition intenses, révélatrices de sa politique de collaboration avec l'écosystème.

Figure 102 : Comparaison d'Iberdrola avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus³³⁶ pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

³³⁵ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

³³⁶ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie.](#)

Sur les trois critères retenus, on remarquera qu'Iberdrola se positionne clairement comme un adopteur d'innovation³³⁷. La part de brevets déposés est, proportionnellement au nombre de projets menés, extrêmement faible : avec seulement quatre brevets dont trois relatifs aux technologies bas carbone, Iberdrola a déposé moins d'un brevet par an entre 2007 et 2013 ; il s'agit donc là d'une démarche à caractère exceptionnel pour l'électricien. En outre, ce résultat est la résultante concrète de la politique d'innovation ouverte qu'il revendique : chercher davantage à acquérir du savoir-faire et à co-crée de l'innovation plutôt que de la générer en interne.

Deuxièmement, on constate un niveau de coopération frappant, d'autant plus remarquable qu'Iberdrola ne participe à aucun projet dans le CCS, caractérisé par son niveau de coopération³³⁸. Un résultat lié au fait qu'Iberdrola conduise les trois quarts des projets des smart grids et les deux tiers des projets énergies renouvelables en collaboration avec, au moins, un autre électricien³³⁹ ; seuls les segments des énergies des mers et du véhicule électrique échappent à ce modèle. Une stratégie à nouveau cohérente avec le positionnement d'adopteur d'innovation que revendique Iberdrola. On retiendra, enfin, la place d'EDF en tant que collaborateur privilégié : parce que, d'une part, EDF est, de fait, présent sur de nombreux projets et, d'autre part, qu'il est l'un de ses partenaires commerciaux de tout premier rang³⁴⁰.

Dernier constat, la démarche de collaboration avec les nouveaux entrants d'Iberdrola s'inscrit, peu ou prou, dans la lignée de celle des autres électriciens. Notons, tout de même, deux projets qui associent un nombre nettement plus conséquent de nouveaux entrants : le projet Capire qui concerne le véhicule électrique et comprend des adjacents du secteur automobile, et le projet LeanWind - en partenariat avec EDF - qui porte sur l'amélioration des processus de construction des unités éoliennes offshore et intègre des acteurs des constructions navales.

2.6.3 Conclusion

Plusieurs constats ressortent de l'analyse des projets et brevets d'Iberdrola sur la période considérée. Premièrement, sa stratégie orientée préférentiellement vers les innovations relevant de l'addition technologique, dont les deux priorités (smart grids et énergies

³³⁷ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui innovent en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

³³⁸ Cf. Chapitre IV, section [2.1.2 Le captage et le stockage du carbone](#).

³³⁹ Non seulement ces ratios sont les plus élevés de l'ensemble des électriciens mais en plus, rappelons que les énergies renouvelables sont caractérisées par une démarche de coopération peu intense. Cf. Chapitre IV section [2.2.2 Les énergies renouvelables](#).

³⁴⁰ Cf. Chapitre V, section [2.1.2 La France : un modèle de bouquet énergétique décarboné et compétitif](#) et section [2.1.4 L'Espagne leader dans l'éolien](#) où nous présentons le fait que l'Espagne importe de France l'électricité en période de base et y exporte le surplus d'électricité renouvelable produit.

renouvelables) sont similaires à celles observées à l'échelle du secteur³⁴¹. Une observation en adéquation avec la stratégie énoncée dans le rapport d'innovation publié en 2013.

Deuxièmement, le degré d'ouverture de démarche de l'acquisition des nouvelles connaissances, le plus marqué de l'ensemble des électriciens, confirme, une fois encore, le modèle d'innovation ouverte revendiqué dans le rapport d'innovation. Iberdrola est caractérisé par un profil d'adopteur, c'est-à-dire qu'il se nourrit des collaborations avec ses parties prenantes pour co-crée de l'innovation plutôt que de la générer en interne, et, cela, alors même qu'il mobilise une part singulièrement élevée de son chiffre d'affaires en faveur des activités de R&D. Tout particulièrement engagé dans une démarche de coopétition, Iberdrola peut, dans une certaine mesure s'appuyer et tirer parti des travaux de ses concurrents.

Enfin, bien qu'Iberdrola soit leader dans le domaine de l'éolien, son avantage compétitif n'est pas concrétisé par le nombre de brevets déposés (seulement trois sur la période considérée, dont aucun ne concerne l'éolien). Sa position de leader sur le secteur ne passe donc pas par une protection des connaissances, mais bien par le savoir-faire acquis à travers son expérience dans le développement des projets éoliens.

³⁴¹ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

2.7 RWE

2.7.1 Les enjeux de la transition énergétique

La part croissante des nouvelles énergies dans l'alimentation électrique de l'Allemagne³⁴² a eu pour effet de tirer vers le bas le prix de l'électricité conventionnelle et de rogner les bénéfices de RWE. A l'instar d'autres acteurs du secteur électrique européen, RWE est confronté à une nécessaire recomposition de son mix énergétique et à la mise en œuvre de plans de restructuration. Une réorientation de ses choix énergétiques est, dorénavant, nécessaire afin que RWE, détenteur de la plus forte intensité carbone des électriciens étudiés, puisse s'adapter à la transition énergétique. En outre, on relèvera, qu'en comparaison des autres électriciens, RWE consacre une part élevée de son chiffre d'affaires aux activités de R&D³⁴³.

Fondé en 1898 à Essen en tant que régie d'électricité de Westphalie rhénane, RWE AG est l'un des principaux fournisseurs d'électricité et de gaz allemand. Il occupe, en Europe, la seconde place sur le marché de l'électricité et la sixième sur celui du gaz (Rapport annuel, 2015). Le groupe développe ses activités dans la production d'électricité à partir du gaz, du charbon, de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables, mais est également actif dans la vente et la distribution de gaz et d'électricité et dans les services énergétiques dont il est le numéro deux allemand. À travers ses filiales, il distribue de l'électricité, du gaz, de l'eau et offre des services environnementaux à plus de 120 millions de clients (particuliers et entreprises), principalement en Europe et en Amérique du Nord. RWE est un groupe peu internationalisé, notamment au regard de son concurrent allemand E.ON. Il possède des filiales au Royaume-Uni et aux Etats-Unis mais, contrairement à plusieurs électriciens européens, il n'est pas entré dans la course à la concentration des années 2000.

En 2015, la capacité totale de RWE atteint 48 052 MW. Le mix est réparti de la manière suivante : charbon et lignite (55%), gaz (32%), nucléaire (8,5%), autres (2%), EnR (8,5%). Les autres capacités de production (pétrole, pompepage...) s'élèvent à 6%. La part particulièrement élevée d'énergies fossiles, et en particulier de charbon, explique que RWE fasse partie des principaux émetteurs de CO₂ en Europe (768 gCO₂/KWh en moyenne annuelle sur la période 2007-2013³⁴⁴).

Jusqu'au milieu des années quatre-vingts, RWE connaît, grâce à son monopole de l'électricité dans la Ruhr, une position dominante sur le marché. Mais, le groupe est contraint d'évoluer pour faire face à la restructuration de l'industrie du charbon, qui résulte de la réunification de l'Allemagne et de la libéralisation du marché européen de l'électricité. Il poursuit, pourtant, pendant la décennie suivante, un développement international avec l'achat, en juin 1998, des activités de Texaco puis avec des prises de participation dans des groupes américains, Vista Chemical et Consolidation Coal. A la toute fin des années 90, alors que s'ouvre le marché de

³⁴² Cf. Chapitre V, section [2.1.1 L'Allemagne : « l'Energiewende » en marche vers un engagement résolu vers les énergies renouvelables.](#)

³⁴³ Cf. Chapitre V, section [1.Comparaison des électriciens.](#)

³⁴⁴ Cf. Figure 66 : [Comparaison de l'intensité carbone moyenne sur la période 2007-2013 des électriciens étudiés.](#)

l'électricité en Europe, RWE décide d'abandonner la stratégie de diversification adoptée dix ans auparavant (déchets, telecoms, construction, ingénierie...) et de concentrer ses ressources, en particulier sur son marché domestique ; il amorce une stratégie « multi-energy multi-utility », pour devenir un prestataire de premier plan dans l'ensemble des métiers de l'énergie : la fusion RWE-VEW annoncée en 1999 doit créer un groupe énergétique intégré sur toute la partie ouest de l'Allemagne, depuis la Suisse jusqu'aux Pays-Bas. Dans les années 2000, RWE va successivement racheter l'entreprise britannique Thames Water (2001), spécialisée dans la gestion des réseaux d'eau, (qui sera revendue dès 2006, pour ne conserver que les opérations internationales hors UK), le groupe Innogy, spécialisé dans la production d'électricité et de gaz au Royaume-Uni (2002), et le fournisseur d'électricité néerlandais Essent (2009). Parallèlement, il signe, via sa filiale britannique RWE Power, un accord avec E.ON UK pour créer une joint-venture destinée à la construction et l'exploitation de nouvelles centrales nucléaires en Grande-Bretagne, (structure qui devrait être confrontée, d'ici les deux prochaines décennies, au remplacement d'un tiers de ses capacités de production d'électricité). Mais à partir de 2013, le groupe est contraint de réviser drastiquement ses objectifs : en novembre 2013, RWE annonce la vente de deux unités de production de sa filiale RWE Npower à Telecom Plus, et, un an plus tard, celle de sa filiale d'hydrocarbures DEA à Mikhaïl Fridman pour 5,1 Md€. Avec un résultat négatif de l'ordre de 2,8 Md€ en 2014 pour la première fois de son histoire, RWE est, aujourd'hui, engagé dans un vaste programme de réorganisation.

La faiblesse du groupe allemand résulte de plusieurs facteurs. Tout d'abord, de la décision du gouvernement allemand d'exclure le nucléaire du mix énergétique national. Ensuite le fournisseur d'électricité doit affronter la lourde dépréciation de ses centrales à gaz : en raison, d'une part, de la baisse des prix de gros de l'électricité due à l'essor des nouvelles énergies qui bénéficient d'un accès prioritaire au réseau allemand et, d'autre part, du prix de la tonne de CO₂ sur le marché des quotas qui rend peu compétitive l'électricité produite à partir de ses centrales. Membre du groupe Magritte, le groupe RWE plaide pour une réforme, voire une abrogation, de la loi allemande EEG, votée en juin 2014, qui régit les subventions allouées aux énergies renouvelables. Et milite pour l'instauration d'un « marché de capacité » permettant de rémunérer les installations conventionnelles (fioul, gaz, charbon...), malmenées par l'essor des EnR, en période d'inactivité. Mais cette revendication laisse le ministère allemand sceptique. Endetté à hauteur de 30,71 Md€, RWE est désormais désireux d'investir dans de nouveaux relais de croissance, comme les énergies renouvelables.

La feuille de route de RWE à horizon 2020 planifie une modification structurelle. Entré tardivement dans le secteur des énergies nouvelles, RWE prévoit d'investir 5 Md€ dans le développement des EnR pour porter sa production d'électricité propre à 4500 MW à horizon 2020. D'ici là, sa filiale Innogy, spécialisée dans les nouvelles énergies, devrait lui permettre d'élever la part des EnR à hauteur de 20% dans sa production totale d'énergie ; un objectif ambitieux alors même que tourné principalement vers la production d'électricité conventionnelle, il convient qu'une part de 6% d'EnR dans son portefeuille de capacités représenterait déjà une première étape importante. Dans le solaire, RWE ne souhaite pas concurrencer frontalement les PME performantes et se positionne davantage comme un

gestionnaire de systèmes. Dans l'éolien offshore, RWE a mis en place un programme de formation spécifique des ingénieurs dont l'expérience acquise dans ce secteur devrait créer des effets d'apprentissage bénéfiques à ses futurs projets.

RWE initie des projets innovants, avec pour objectif de se positionner en tant que gestionnaire global de l'énergie du futur. En 2013, RWE a lancé, en partenariat avec Nexans, un projet pilote, « Ampacity » destiné à la construction d'un câble supraconducteur compact et à haute efficacité énergétique, en remplacement d'un câble haute tension dans la ville d'Essen. Il est soutenu financièrement, (à hauteur de 5,9 M€ sur les 13,5 M€ investis dans le projet) par le Ministère fédéral allemand de l'Economie (BMWi) en charge de l'environnement et de l'énergie, et pour l'essai sur le terrain par l'Institut Technologique de Karlsruhe (KIT), qui lui fournit une assistance scientifique. Par ailleurs, RWE investit massivement dans les réseaux intelligents, notamment avec le projet « Smart Operator », débuté en 2012 dans des zones semi-urbaines dans l'Ouest et le Sud de l'Allemagne. En impliquant consommateurs, producteurs et accumulateurs d'énergie, les fluctuations de charge peuvent être compensées par des charges mobiles ; c'est l'objectif de ce projet de gestion de charge automatisée sur le réseau basse tension opérant comme un système intelligent décentralisé.

Au Pays de Galles, RWE expérimente, en partenariat avec RWE Npower, Peel Energy et DONG Energy, le dispositif de post-combustion qui devrait permettre de capter chaque jour environ 50 tonnes de CO₂ ; RWE Npower s'est également engagé à tester cette technologie ainsi que l'oxycombustion sur la centrale thermique à charbon de Didcot, Oxfordshire.

Enfin, dans le cadre de sa diversification, RWE est impliqué dans la mobilité électrique. En tant que grand opérateur d'infrastructures et premier acteur de la distribution d'électricité en Allemagne, RWE travaille actuellement avec plus de soixante partenaires de services publics pour réfléchir à des solutions intelligentes sur ce secteur avec une implication dans neuf projets différents. Financé par le Ministère des Transports allemand et en partenariat avec cinq entreprises, RWE s'est fixé pour objectif de faire de Dortmund, un centre d'e-mobilité (metropole-E). Il expérimente, également, de nouveaux systèmes de gestion de flotte et de charge, et a mis en place deux mini-éoliennes et deux installations photovoltaïques qui produisent de l'électricité verte. RWE est, par ailleurs, engagé dans le projet "E-merge" dans le cadre de l'amélioration du développement urbain : une flotte de 175 véhicules électriques est testée dans deux régions d'Allemagne, auxquelles il fournit les points de charge. Et travaille à la standardisation des interfaces entre les véhicules électriques, les points de recharge et le réseau d'électricité au niveau international. De plus, en 2012, le groupe ABB, leader des technologies d'alimentation énergétique et d'automatisation, et RWE, sont parvenus à un accord pour collaborer étroitement à la recherche d'une offre technologique combinée de mise en réseau d'une infrastructure de charge destinée aux véhicules électriques.

RWE a engagé une restructuration profonde de son mix énergétique et de son organisation. Dans le même temps, il est à l'initiative de différents projets en coopération avec des acteurs de la recherche, de la sphère académique et les parties prenantes du groupe.

2.7.2 Analyse de la stratégie d'innovation

Parce qu'elle expose ses infrastructures de production d'électricité les plus carbonées à un risque d'actifs échoués en cas de contrainte réglementaire plus stricte sur les émissions de CO₂³⁴⁵, la forte dépendance de RWE aux énergies fossiles, et au charbon en particulier, amène à s'interroger sur la direction poursuivie par sa stratégie globale, (vers l'addition ou la substitution technologique), et ses priorités technologiques : dans quelle mesure l'exploration du CCS, qui permettrait de poursuivre l'usage de ses centrales en augmentant leurs performances environnementales, est-elle privilégiée à celle des énergies renouvelables pourtant revendiquées comme un pilier de sa transition énergétique ? De même, alors que l'Allemagne a décidé de s'affranchir du nucléaire qui représente 15% de son mix énergétique, il sera intéressant d'identifier dans quelle mesure RWE est engagée dans des travaux de recherche sur ce domaine. En outre, la volonté de modifier structurellement son mix énergétique et de se positionner sur de nouveaux domaines pose la question des modalités d'acquisition des connaissances, de la démarche d'ouverture mise en œuvre, et de des collaborations avec les nouveaux entrants ou les autres électriciens.

2.7.2.1 Analyse de la stratégie technologique

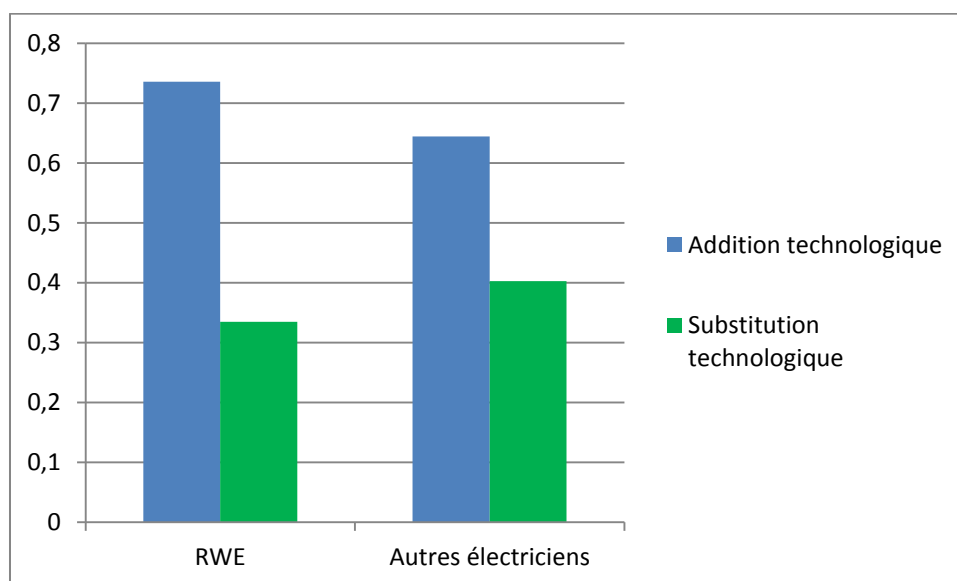
RWE est engagé dans 20 projets du 7^{ème} PCRD dont 18 concernent le périmètre des technologies étudiées, pour un coût total cumulé de 170 M€ avec un financement de la Commission européenne de 102 M€. Entre 2007 et 2013, 254 brevets ont été déposés par RWE dont 47% concernent des brevets verts au sens de l'Inventaire vert de l'OMPI, 1%, à peine des brevets verts relevant de technologies non énergétiques³⁴⁶ et 7% des brevets verts énergétiques non inclus dans le périmètre d'étude. Au total, RWE a déposé 100 brevets dans les domaines technologiques étudiés, soit 39% de son portefeuille de brevets déposés sur la période 2007-2013.

L'analyse de ces projets et brevets déposés par RWE répond, sans ambiguïté, sur l'orientation de sa stratégie globale : il privilégie nettement les technologies d'addition à celles de substitution, et s'engage dans ces dernières, dans des proportions très inférieures aux autres électriciens.

³⁴⁵ On pense notamment à un prix de marché de la tonne de carbone plus élevé qu'il ne l'a été entre 2007 et 2013.

³⁴⁶ Les technologies vertes non énergétiques concernent la diminution des impacts sur l'environnement telles que la gestion de l'eau ou des sols.

Figure 103 : Comparaison de l'intensité³⁴⁷ de l'engagement de RWE dans les innovations relevant de la substitution et de l'addition technologique avec celui de l'ensemble des électriciens



Source : auteur

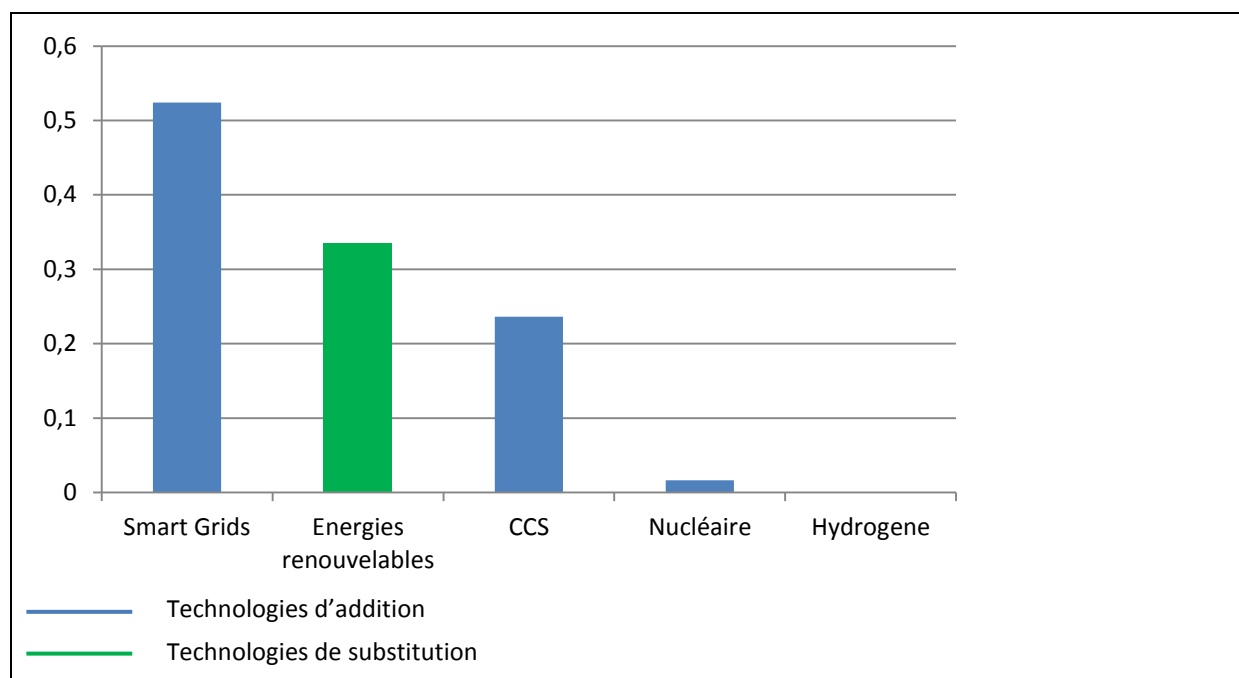
Les trois domaines technologiques explorés par RWE sont les suivants : smart grids, énergies renouvelables et le CCS ; l'impasse est faite sur le nucléaire³⁴⁸ et l'hydrogène, concentration surprenante au regard de son intensité plutôt élevée de R&D. Notons, que les deux premiers domaines explorés par RWE concernent les technologies les plus systémiques et également les plus explorées à l'échelle du secteur³⁴⁹.

³⁴⁷ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

³⁴⁸ Aucun projet n'a été mené dans le domaine du nucléaire et seulement 2% des brevets concernent ce domaine.

³⁴⁹ Cf. Chapitre IV, section [3. Conclusion](#).

Figure 104 : Intensité³⁵⁰ de l'engagement de RWE à partir des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD



Source : auteur

Dans le domaine des smart grids, la répartition des 49 brevets (RWE est le premier déposant dans ce domaine sur la période) et des 10 projets (Figure 105) met en évidence sa présence sur l'ensemble des segments. Les segments des réseaux et Intégration des EnR et de la gestion IT de la demande sont explorés prioritairement, à l'instar des autres électriciens³⁵¹, dans des proportions conséquentes révélatrices de leurs enjeux, consécutif à l'introduction massive des EnR en Allemagne³⁵². La question des réseaux s'avère de la même manière cruciale, puisque RWE est l'un des premiers exportateurs européens d'électricité³⁵³. De plus, RWE se distingue des autres électriciens par l'importance de sa présence dans le véhicule électrique (30% des projets, dont les deux tiers en tant que coordinateur et 43% des brevets) en adéquation avec son engagement dans ce domaine. Un positionnement qui s'explique également par le leadership du secteur automobile allemand à l'échelle mondiale et la densité du tissu industriel allemand dans ce secteur.

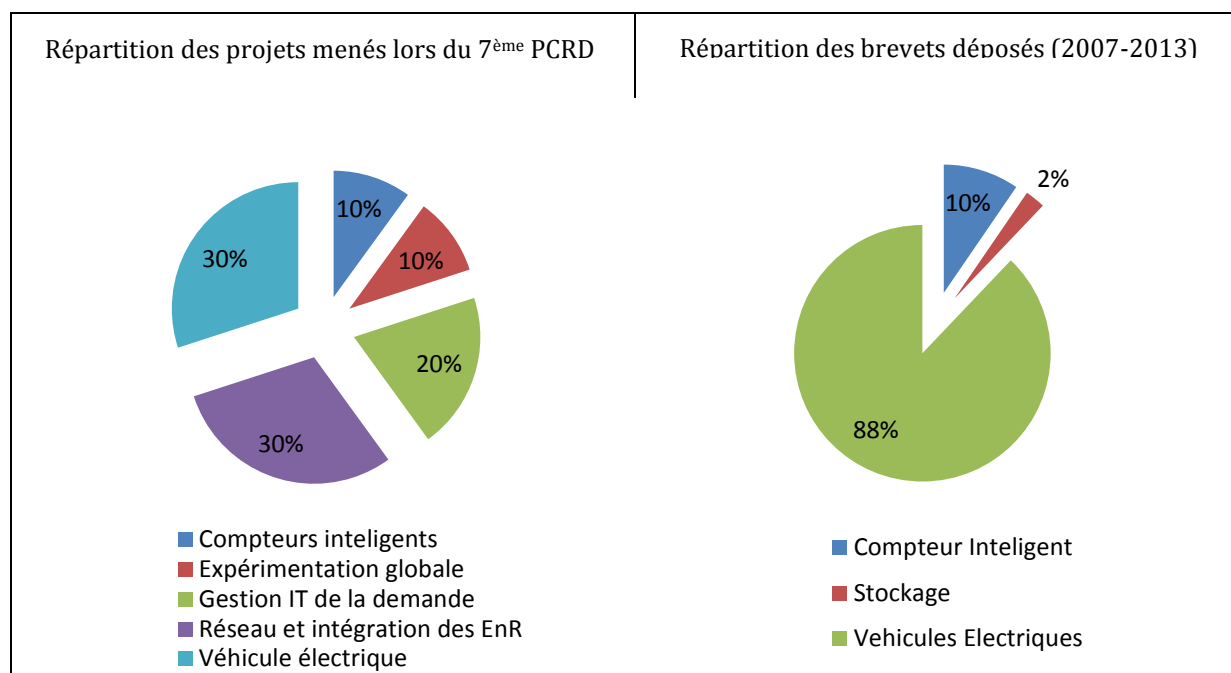
³⁵⁰Cf. Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

³⁵¹Cf. Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grids](#).

³⁵²Cf. Chapitre V, section [2.1.1. L'Allemagne : « l'Energiewende » en marche pour un engagement résolu en faveur des énergies renouvelables](#).

³⁵³Cf. Chapitre V, section [2.1.1. L'Allemagne : « l'Energiewende » en marche pour un engagement résolu en faveur des énergies renouvelables](#).

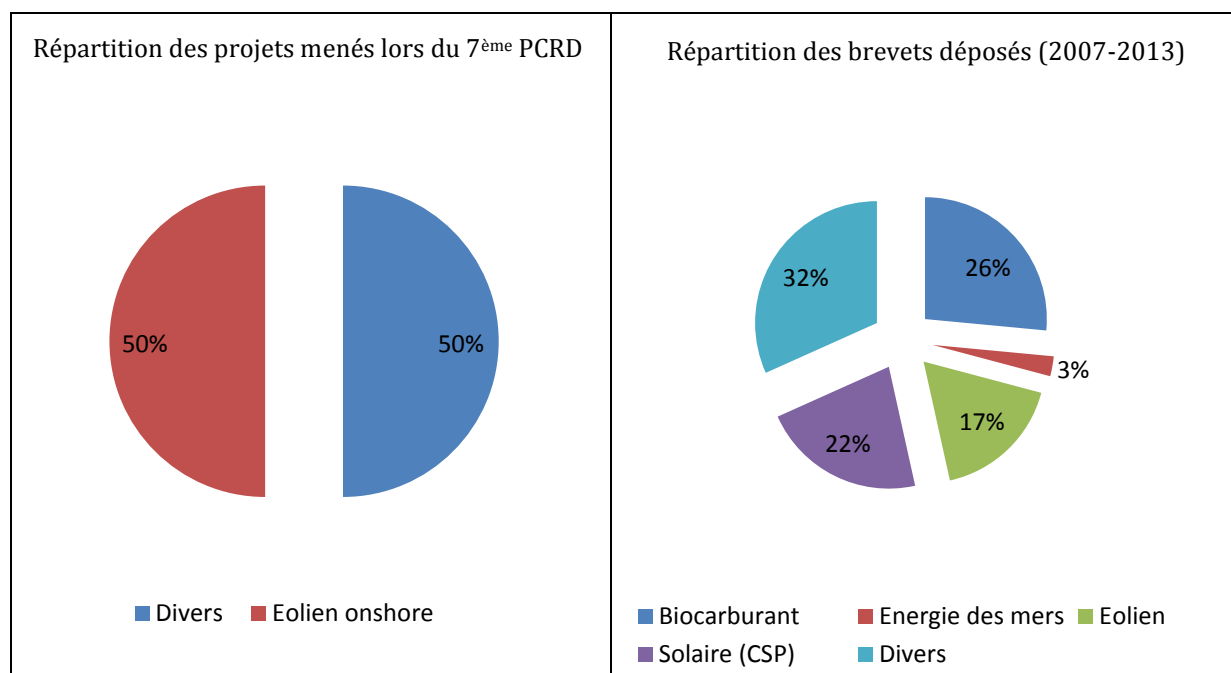
Figure 105 : Répartition des brevets et des projets de RWE dans le domaine des smart grids



Source : auteur à partir des bases Patstat et Cordis

Ensuite, avec une part respective de 46% du portefeuille de projets et de 11% du portefeuille de brevets, les énergies renouvelables représentent le second domaine technologique exploré, une place cohérente avec l'objectif de porter la part des énergies renouvelables à 20% de la production totale d'électricité à horizon 2020. 2 projets seulement concernent les énergies renouvelables, toutefois les 46 brevets déposés montrent la diversité des segments explorés, alors même que RWE est un groupe peu internationalisé et donc peu exposé à la captation de son savoir-faire par des acteurs locaux. Si le solaire à concentration et l'éolien sont principalement représentés, en raison du soutien de l'Allemagne en la matière, notons la forte présence du secteur des biocarburants, révélatrice, à nouveau, de son positionnement sur les questions de mobilité bas carbone, et de l'influence du tissu industriel automobile allemand.

Figure 106 : Répartition des brevets et des projets de RWE dans le domaine des énergies renouvelables



Source : auteur à partir des bases Patstat et Cordis

Enfin, le CCS est le troisième domaine technologique exploré par RWE. Ce qui s'explique par la présence prépondérante des énergies fossiles dans son mix énergétique (lequel repose à hauteur de 60% sur le charbon) et qui l'inscrit au premier rang des électriciens étudiés en termes d'intensité carbone³⁵⁴. Même si aujourd'hui la part élevée du charbon comparativement à celle du gaz tendrait plutôt à être un atout, - notamment vis-à-vis de son concurrent allemand E.ON, parce qu'il lui offre la possibilité d'exporter une part de son électricité dont le coût de production est, de ce fait, plus compétitif - une augmentation du coût de la tonne de CO₂ consécutive à une réglementation européenne plus contraignante en matière d'émission pourrait avoir des conséquences catastrophiques. Pour se prémunir contre le phénomène des « actifs échoués », RWE explore donc les enjeux du stockage (projets CO2CARE et RISCS), du transport (projet CO2EUROPIPE) et se concentre sur la technique de post-combustion (projet CESAR). Notons qu'aucun projet collaboratif mené dans le cadre du 7^{ème} PCRD conduit par RWE ne concerne les technologies de pré-combustion, ni d'oxycombustion.

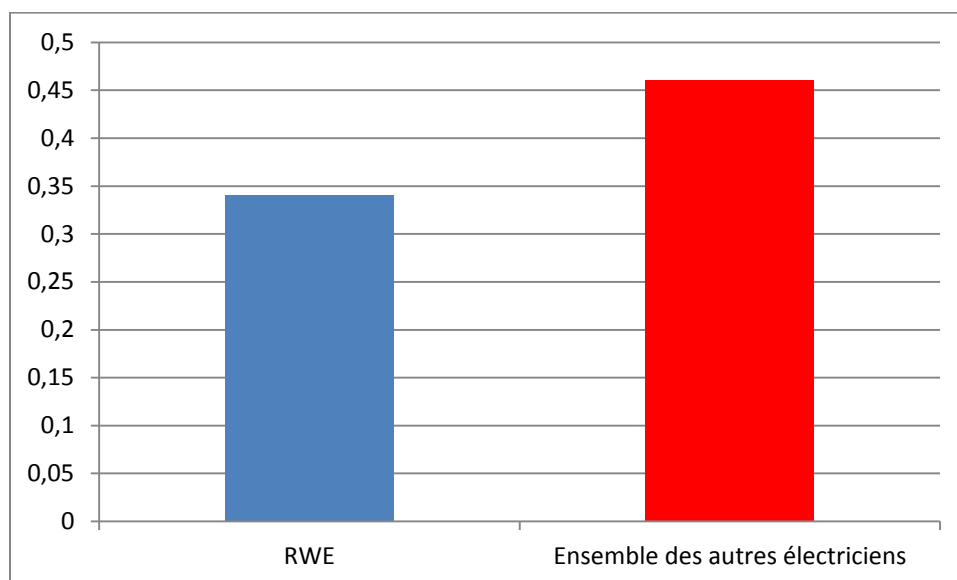
Enfin, on notera que l'impasse technologique sur le nucléaire est plutôt judicieuse au regard de la décision de l'Allemagne de sortir de cette énergie d'ici 2020, et que l'absence de RWE sur l'hydrogène s'explique par la présence peu marquée de l'électricien dans le gaz.

³⁵⁴ Cf. Figure 66 : [Comparaison de l'intensité carbone moyenne sur la période 2007-2013 des électriciens étudiés.](#)

2.7.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des connaissances

RWE est avec EDF, l'électricien dont la démarche d'ouverture est la moins affirmée de l'ensemble des électriciens, manifeste de sa volonté de ne pas s'appuyer sur les parties prenantes dans le processus d'innovation.

Figure 107 : Comparaison du niveau d'ouverture³⁵⁵ de la démarche d'acquisition des connaissances de RWE avec celui des autres électriciens

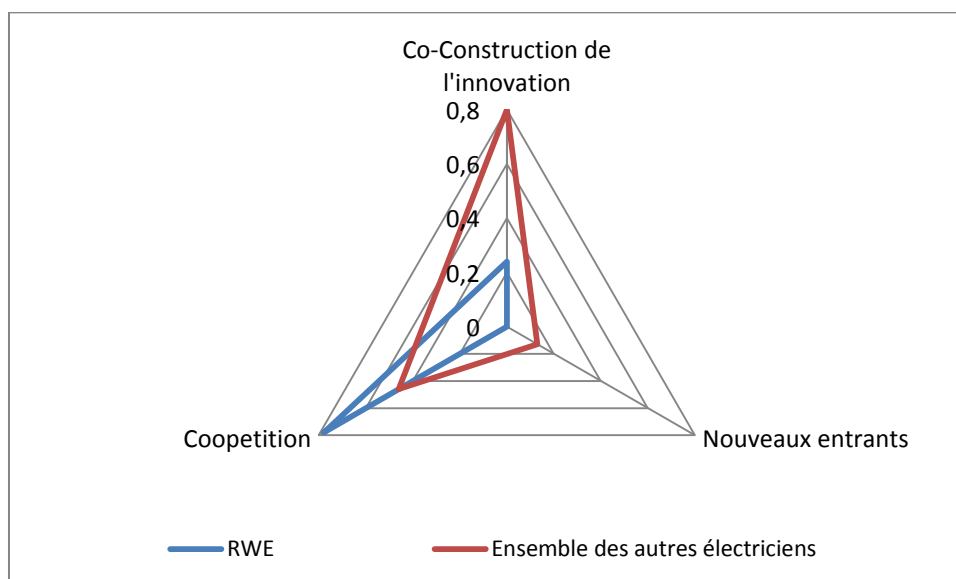


Source : auteur

Le niveau particulièrement bas de l'indice d'ouverture est dû au niveau de « Co-construction de l'innovation » et à la démarche de collaboration avec les nouveaux entrants particulièrement faible. Cependant, RWE se démarque des autres électriciens par un niveau de « Coopétition » particulièrement élevé (Figure 108).

³⁵⁵ La méthodologie de calcul de cet indicateur est présentée dans le Chapitre III, section [3.Présentation de la méthodologie](#).

Figure 108 : Comparaison de RWE avec les autres électriciens sur la base des trois critères retenus³⁵⁶ pour mesurer l'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances



Source : auteur

La part des projets de RWE est beaucoup plus faible que celle des brevets³⁵⁷ ; ce qui signifie que le groupe s'inscrit davantage dans un profil de générateur d'innovation plutôt que d'adopteur³⁵⁸. Observons, en outre, que cette démarche est menée dans des proportions supérieures à celle des autres électriciens. Ce modèle est surprenant, d'une part, au vu de l'ancrage de RWE dans l'architecture fossile, qui nécessiterait pour s'y soustraire de multiplier, au contraire, les partenariats avec les électriciens et, d'autre part, au vu du retard accumulé dans les énergies renouvelables.

On retiendra, à l'instar d'EDF qui offre le même profil de générateur d'innovation³⁵⁹, la démarche de dépôts de brevets verts et celle de non verts poursuivent une trajectoire similaire - ce qui n'est pas le cas de la plupart des électriciens et tend à suggérer que les dépôts de brevets dans ce secteur s'inscriraient davantage dans une stratégie formalisée que dans une forme d'opportunisme.

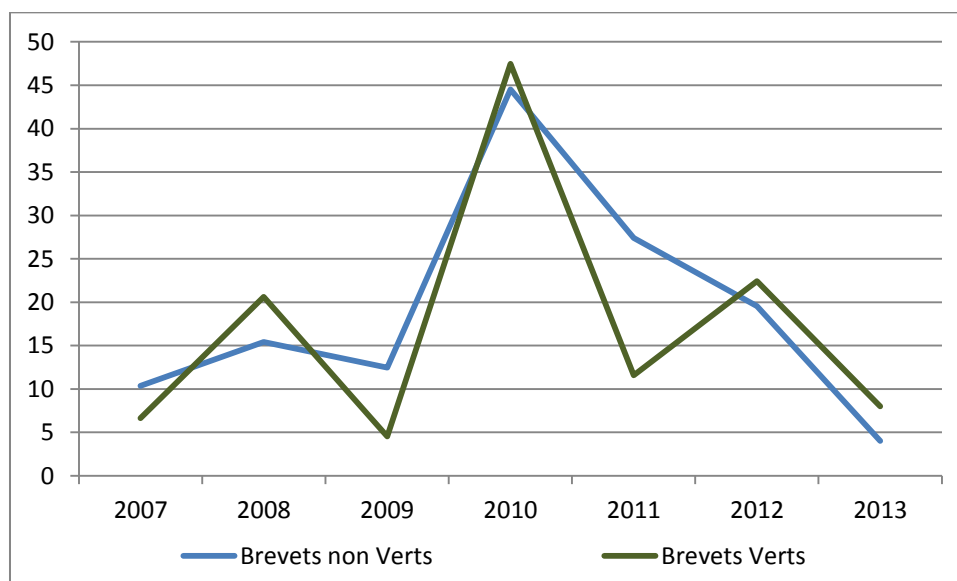
³⁵⁶ La méthodologie de calcul de ces trois indicateurs est présentée dans le Chapitre III, section [3. Présentation de la méthodologie](#).

³⁵⁷ Conduisant à ce que l'indicateur de co-construction de l'innovation soit inférieur à 0,5.

³⁵⁸ Selon la définition d'Hollanders (2007) qui distinguait deux principaux profils d'innovateur : les producteurs de technologie qui introduisent des innovations développées en interne et les adopteurs de technologie qui innoveraient en diffusant les innovations générées par des tiers. Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales](#).

³⁵⁹ Cf. Chapitre V, section [2.2.2.2 Analyse des modalités d'acquisition des connaissances](#) d'EDF.

Figure 109 : Comparaison de l'évolution des brevets verts et non verts déposés par RWE entre 2007 et 2013



Source : auteur, à partir de la base Patstat et de l'Inventaire vert de l'OMPI

Deuxième constat, RWE est caractérisée par son niveau de coopération particulièrement élevé, supérieur à celui de l'ensemble des autres électriciens. Un niveau que n'explique que partiellement la nature fortement collaborative des projets qu'il privilégie (smart grids et CCS)³⁶⁰. La collaboration avec ses concurrents semble, en effet, s'inscrire davantage dans une stratégie formalisée, que conditionnée par son positionnement technologique ; à titre d'exemple, deux tiers des projets qu'il conduit dans le domaine des véhicules électriques associent un autre électricien, alors que ce domaine fait ordinairement l'objet de très peu de coopérations³⁶¹. Un constat en contradiction avec les résultats précédents : alors que RWE ne s'appuie que très peu sur son écosystème, et privilégie un modèle de génération interne d'innovation, il est, en revanche, plus engagé que les autres électriciens dans la démarche de coopération.

Notons, a contrario, que RWE est caractérisé par la proportion la plus faible de projets orientés « Nouveaux entrants » : aucun projet mené par RWE n'associe une part supérieure de nouveaux entrants à l'ensemble des autres projets. Ce résultat s'avère surprenant au regard de la part des énergies renouvelables et de smart grids dans son portefeuille de projets et en particulier, le domaine du véhicule électrique qui, par définition, voit habituellement les acteurs de l'automobile jouer un rôle crucial³⁶². Cette stratégie contrastée suggère la difficulté que rencontre RWE à sortir de l'architecture fossile et à compléter son réseau de partenaires par de nouveaux acteurs.

³⁶⁰ Cf. Chapitre IV, section [2.1.2 Le captage et le stockage du carbone](#) et section [2.1.3 Les smart grids](#).

³⁶¹ Cf. Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grid](#).

³⁶² Cf. Chapitre IV, section [2.1.3 Les smart grid](#) et section [2.2.2 Les énergies renouvelables](#).

2.7.3 Conclusion

Bien que RWE soit l'électricien disposant de l'intensité carbone moyenne la plus élevée sur la période 2007-2013³⁶³, le groupe est plutôt orienté vers les innovations relevant de l'addition technologique – il est même l'électricien le plus engagé, après EDF, dans les innovations de cette catégorie. Ses deux priorités technologiques sont, conformément à la dynamique observée à l'échelle du secteur³⁶⁴, les innovations systémiques : énergies renouvelables et smart grids. Retenons, également, sa forte participation dans le segment de la mobilité bas carbone (véhicule électrique, biocarburant), probablement en raison de la densité du tissu industriel allemand dans l'automobile.

Alors qu'on pourrait penser que RWE s'inscrirait dans une démarche plutôt ouverte pour acquérir les connaissances qui lui font défaut, cette dernière s'avère, au contraire, assez fermée. Il collabore peu avec les nouveaux entrants et présente un profil de générateur d'innovation bas carbone : son modèle d'innovation repose principalement sur la génération interne plutôt que sur la co-crédation avec les parties prenantes. Un modèle assez peu cohérent avec l'intensité carbone de sa production électrique (la plus élevée des électriciens considérés) et le retard accumulé dans les énergies renouvelables qui nécessiterait, pour être compensé, des interactions plus nourries avec les parties prenantes.

Enfin, dans la mesure où RWE est fortement engagé dans les technologies relevant de l'addition, et que celles-ci font l'objet d'une démarche marquée par son niveau d'ouverture³⁶⁵, il est raisonnable de supposer que, si la démarche de RWE était conditionnée par son positionnement, elle suivrait une tendance comparable. Or, le phénomène inverse est observé : ses modalités d'acquisition des connaissances semblent donc formalisées au sein d'une stratégie globale et non déterminées par son positionnement technologique.

³⁶³ Cf. Figure 66 : [Comparaison de l'intensité carbone moyenne sur la période 2007-2013 des électriciens étudiés.](#)

³⁶⁴ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

³⁶⁵ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques.](#)

3. CONCLUSION

Les études de cas réalisées dans la section précédente ont permis de caractériser les stratégies d'innovation des six plus importants électriciens européens sur la base de l'analyse des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Cette conclusion met en perspective les résultats obtenus à travers l'analyse de chaque électricien avec ceux issus de l'analyse conduite à l'échelle du secteur. Nous commencerons par présenter les résultats portant sur la stratégie technologique, puis ceux concernant les modalités d'acquisition des nouvelles connaissances.

3.1 L'ANALYSE DES STRATEGIES TECHNOLOGIQUES

Les priorités technologiques observées à l'échelle du secteur (smart grids, suivis des énergies renouvelables, du nucléaire, de l'hydrogène et enfin du CCS)³⁶⁶ ne sont pas identiques à celles de chacun des électriciens étudiés. Chaque électricien a développé un portefeuille technologique unique combinant les domaines dans des proportions différentes, certains de ces portefeuilles étant, d'ailleurs, caractérisés par des impasses technologiques. Après être revenu sur les éléments marquants des stratégies technologiques³⁶⁷, nous présenterons les trois raisons permettant d'expliquer les positionnements technologiques observés à la lumière des brevets et des projets.

Premièrement, si, à l'échelle du secteur, nous observions que les technologies d'addition faisaient l'objet d'un engagement supérieur par rapport aux technologies relevant de la substitution (mettant en évidence une stratégie d'accumulation créatrice³⁶⁸), les études de cas des électriciens ont permis d'affiner ce premier résultat. Ainsi, la comparaison des électriciens, met en évidence que les acteurs les plus dépendants des énergies fossiles (disposant donc de l'intensité carbone la plus élevée) et pour lesquels la transition énergétique impose ainsi un défi de plus grande envergure, n'explorent pas les technologies de substitution de façon plus intensive que ceux qui disposent de l'intensité carbone la plus faible³⁶⁹ infirmant ainsi notre *Hypothèse 3 : les électriciens dont l'intensité carbone est la plus élevée fait l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs*. De plus, il apparaît que la plupart des électriciens (à l'exception notable d'E.ON) disposent d'un engagement plus marqué dans les technologies d'addition par rapport à celles de substitution. E.ON se singularise des autres électriciens par la mise en œuvre d'une stratégie de destruction créatrice³⁷⁰ qui est cohérente eu égard à la scission de ses activités thermiques de celles bas carbone prévue d'ici la fin de l'année 2016.

³⁶⁶ Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

³⁶⁷ Nous renvoyons le lecteur aux différentes études de cas pour l'analyse des stratégies technologiques de chacun des électriciens.

³⁶⁸ Pour rappel, une démarche d'accumulation créatrice, à ne pas confondre avec l'effet du bateau à voile, est caractérisée par une démarche d'innovation capitalisant sur des connaissances déjà existantes.

³⁶⁹ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

³⁷⁰ Cf. Chapitre II, section [1.1 Fondements théoriques de la compétition technologique](#).

Deuxièmement, alors que l'analyse sectorielle des domaines technologiques révèle que les smart grids et les énergies renouvelables sont les deux domaines technologiques les plus explorés, ce résultat s'expliquant par leur caractère particulièrement systémique vis-à-vis des autres technologies³⁷¹, les études de cas révèlent des priorités technologiques différentes pour les électriciens. Tout d'abord, les seuls électriciens pour lesquels les smart grids et les énergies renouvelables sont les deux premiers domaines explorés sont RWE et Enel. Ensuite, il apparaît que, pour la majorité des électriciens étudiés (Engie, Enel, E.ON et RWE), le CCS fait partie des trois principaux domaines explorés alors qu'il se classait au dernier rang à l'échelle du secteur. Ces résultats permettent de nuancer ceux obtenus à l'échelle du secteur qui classaient le CCS comme la technologie faisant l'objet de l'engagement le plus faible parmi l'ensemble des domaines considérés³⁷². Dans la mesure où ces électriciens disposent de l'intensité carbone la plus élevée, le CCS permet d'augmenter les performances environnementales des centrales thermiques et d'éviter ainsi d'en faire des actifs échoués en cas d'augmentation conséquente du prix du CO₂.

Notons que le décalage observé entre les résultats à l'échelle du secteur et ceux au niveau de chacun des électriciens s'explique par un effet « taille » dû à la présence d'EDF dans le périmètre des électriciens étudiés. La participation d'EDF à 69 projets (soit 55% du total des projets) et le dépôt de 156 brevets (56% du total des brevets) a conduit à une sur-représentation du nucléaire et de l'hydrogène et à une sous-représentation du CCS dans le classement des priorités technologiques au niveau sectoriel. De plus, l'analyse sectorielle ne permettait pas de mettre en évidence le phénomène d'impasse technologique portant sur les domaines du nucléaire et de l'hydrogène qui sont explorés exclusivement par la moitié des électriciens étudiés. En particulier, le nucléaire n'a fait ni l'objet d'un dépôt de brevet ni d'une participation à des projets pour Engie, RWE et Enel et l'impasse technologique sur l'hydrogène concerne trois électriciens suivants (Enel, Iberdrola et RWE).

Troisièmement, le niveau de l'intensité R&D³⁷³ des électriciens ne constitue pas un indicateur pertinent pour apprécier la diversité des domaines explorés par les électriciens à l'aune des brevets et des projets. Alors que RWE dispose d'une intensité R&D parmi la plus élevée des électriciens étudiés, il réalise une impasse technologique dans les domaines de l'hydrogène et du nucléaire. A l'opposé, E.ON est présent sur l'ensemble des domaines analysés, alors qu'il dispose de l'intensité R&D la plus faible des électriciens étudiés.

L'analyse des brevets et des projets a permis de mettre en évidence des stratégies technologiques différentes pour chacun des électriciens. Nous avons distingué trois raisons permettant d'expliquer les stratégies technologiques.

Tout d'abord, les électriciens sélectionnent les domaines technologiques sur lesquels ils s'engagent afin de capitaliser sur leurs avantages compétitifs lorsqu'ils en disposent. Cela se manifeste pour EDF, premier producteur mondial d'électricité nucléaire qui est le plus actif

³⁷¹ Cf. Chapitre IV, section [3. Conclusion](#).

³⁷² Cf. Chapitre IV, section [1. Comparaison des domaines technologiques](#).

³⁷³ Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

dans ce domaine et pour Iberdrola qui investit le champ de l'éolien offshore afin de renforcer sa position de leader mondial de l'éolien.

Ensuite, les synergies entre les activités dans lesquelles les électriciens et les technologies bas carbone permettent d'expliquer le positionnement technologique. Ainsi, le fait qu'Engie et E.ON soient significativement engagés dans la production et la distribution de gaz, permet d'expliquer leur engagement, supérieur à celui des autres électriciens, dans le domaine de l'hydrogène.

Enfin, la constitution des portefeuilles technologiques des électriciens peut s'expliquer par le « contexte » dans lequel ils évoluent. Le « contexte » s'entend par les caractéristiques d'un système qui ne peuvent pas être directement modifiées par la seule volonté des acteurs (Rip et Kemp, 1998; Geels, 2002). Cet environnement concerne, d'une part, les ressources naturelles auxquelles les électriciens ont facilement accès. Enel se positionne sur les technologies solaires dans la mesure où les zones géographiques dans lesquelles il se développe sont particulièrement ensoleillées (Italie, Espagne, Moyen-Orient, Amérique latine, Afrique). EDF explore les énergies des mers afin de tirer parti du potentiel de la France qui dispose, avec 11 millions de kilomètres carrés, du deuxième espace maritime mondial. La facilité d'accès à ces ressources permet de minimiser les efforts pour tester les technologies et générer, ainsi, de l'innovation ou du savoir-faire. L'environnement concerne, d'autre part, l'écosystème industriel dans lequel évolue l'électricien. Ainsi, la position de leader international de l'industrie automobile allemande permet d'expliquer la forte participation de RWE au développement de la mobilité bas carbone. Cet environnement technologique constitue un terrain propice aux expérimentations, favorisant les interactions, l'exploration de nouveaux domaines et encourageant la prise de risque des acteurs.

Ces éléments permettent de confirmer le caractère évolutionniste du processus de sélection des domaines technologiques par les électriciens. Dans la mesure où, depuis soixante ans, des politiques industrielles et énergétiques différentes ont été mises en place en Italie, en France en Allemagne et en Espagne³⁷⁴, les électriciens ne disposent pas du même profil énergétique : leur mix énergétique s'appuie sur des énergies fossiles dans des proportions très variées, leur portefeuille d'activité est différent, chacun d'entre eux dispose d'avantages compétitifs plus ou moins marqués. Ces éléments signifient qu'ils ne sont pas soumis aux mêmes enjeux au regard de la transition énergétique et, justifient, ainsi la mise en place de stratégies différentes. En outre, le contexte, à savoir les ressources naturelles disponibles et l'environnement industriel dans lequel chaque électricien évolue, joue également un rôle important dans la sélection des technologies et l'intensité de l'engagement.

Enfin, on remarque que la crise du secteur électrique ne joue pas un rôle identique dans la transformation des électriciens. Alors que dans le cas d'E.ON elle représente, d'une certaine façon, un catalyseur l'entraînant à explorer, dans des proportions supérieures, les technologies de substitution vis-à-vis de celles relevant de l'addition, l'effet n'est pas aussi radical pour les autres électriciens qui restent principalement orientés vers des technologies d'addition. En particulier, bien qu'Enel soit frappé de plein fouet par la crise du secteur italien de

³⁷⁴ Cf. Chapitre V, section [2.1 Les enjeux des principaux pays européens vis-à-vis de la transition énergétique](#).

l'électricité³⁷⁵, le conduisant à mettre à l'arrêt de nombreuses centrales, l'analyse des brevets et des projets met en évidence qu'il poursuit une stratégie significativement orientée vers les technologies d'addition.

3.2 L'ANALYSE DES MODALITES D'ACQUISITION DES CONNAISSANCES

A travers une analyse portant sur les collaborations menées avec les autres électriciens, les coopérations engagées avec les nouveaux entrants et le niveau de co-construction de l'innovation, les études de cas ont mis en évidence une variété de démarches pour acquérir les nouvelles connaissances. Nous présentons ici les principaux résultats.

Primo, si à l'échelle du secteur, nous observions que les technologies d'addition faisaient l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée que les technologies de substitution, les études de cas ont permis d'affiner ce résultat. Tout d'abord, l'analyse des électriciens a permis de démontrer que la stratégie technologique ne conditionnait pas la démarche d'acquisition des connaissances. A titre d'exemple, on peut citer le cas de RWE qui dispose d'une démarche d'ouverture particulièrement peu marquée en comparaison de celle mise en œuvre par les autres électriciens et, cela bien qu'il soit principalement orienté vers des technologies d'addition. A l'opposé, E.ON se distingue des autres électriciens par une stratégie plus orientée vers les technologies de substitution que vers celles relevant de l'addition, bien qu'il mette en œuvre une démarche d'acquisition des connaissances la plus ouverte.

Deusio, il apparaît ainsi que les électriciens disposant de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'ouverture la plus prononcée pour acquérir les connaissances. Cela s'explique par le fait que ce sont des acteurs qui sont particulièrement liés aux énergies fossiles et qu'il est donc particulièrement requis pour eux de s'appuyer sur leur écosystème pour modifier leur trajectoire technologique. Ces éléments permettent de vérifier *l'Hypothèse 4 : les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'acquisition des nouvelles connaissances la plus ouverte.*

Tertio, les études de cas menées sur la base des brevets et des projets permettent de distinguer des profils plutôt « adopteurs » d'innovation³⁷⁶ (Enel, E.ON, Iberdrola et Engie) des profils plutôt « générateurs » d'innovation (EDF et RWE). Alors que, pour les premiers, les collaborations avec l'écosystème jouent un rôle majeur dans le processus d'innovation vis-à-vis de la génération interne, il apparaît, qu'à l'opposé, les seconds sont plutôt caractérisés par une proportion élevée de brevets par rapport aux projets signalant une volonté de générer en interne l'innovation plutôt que de la co-construire avec des partenaires externes. Cette distinction, introduite par Hollanders (2007), mérite toutes fois d'être nuancée dans le cas que nous étudions. Tout d'abord, en tant qu'opérateurs d'infrastructures (de production, de transmission et de distribution), les acteurs du secteur électrique consacrent une part de leur

³⁷⁵ Cf. Chapitre V, section [2.1.3 Le secteur de l'électricité en Italie, un marché en crise.](#)

³⁷⁶ Cette distinction s'appuie sur les travaux d'Hollanders (2007). Cf. Chapitre II, section [2.2 Le rôle des collaborations pour faciliter l'introduction des innovations environnementales.](#)

chiffre d'affaires inférieur à la R&D que leurs fournisseurs industriels. La Commission européenne (2016) met en évidence que l'intensité R&D des acteurs du secteur électrique atteignait 1% de leur chiffre d'affaires en 2015 contre 6,8% pour leurs fournisseurs. Même s'ils déposent des brevets et investissent ensemble plusieurs milliards d'euros dans la recherche et l'innovation, les électriciens restent donc significativement dépendants des innovations et de la technologie apportée par leurs fournisseurs même pour les profils qualifiés de « générateurs d'innovation ». Ensuite, d'un point de vue méthodologique, nos résultats s'appuient sur l'analyse des brevets déposés entre 2007 et 2013 et des projets collaboratifs menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD et n'incluent donc pas la totalité des innovations développées par les électriciens étudiés, qu'il s'agisse, par exemple, de projets collaboratifs menés hors du PCRD ou d'innovations conservées secrètes. Bien que la distinction présentée ci-dessus doive être comprise avec précaution, nous pouvons cependant interpréter les résultats obtenus comme un engagement, plus ou moins marqué, des acteurs dans « l'innovation ouverte » (Chesbrough, 2006) et déduire leur capacité à être agile au sein d'un secteur électrique en profonde mutation.

Notons que c'est le nombre de brevets qui constitue le facteur « discriminant » permettant d'aboutir à ce résultat. Alors que RWE et EDF sont les deux plus importants déposants de brevets (avec respectivement 156 et 100 brevets déposés sur la période considérée), Iberdrola, E.ON et Enel se classent au dernier rang des déposants et, cela ,avec un nombre de brevets particulièrement limité (respectivement trois pour E.ON et Iberdrola et dix pour Enel). En revanche, le nombre de projets dans lesquels participent les électriciens ne permettent pas d'aboutir à des conclusions robustes. EDF et RWE disposent tous deux d'un profil d'adopteur d'innovation et RWE est relativement peu engagé dans les projets alors qu'EDF est l'électricien qui participe au plus grand nombre de projets. De même, Iberdrola est l'électricien qui dispose du niveau le plus élevé de l'indicateur « Co-construction de l'innovation » alors qu'il participe au plus faible nombre de projets. En outre, alors qu'il aurait été raisonnable de penser que le profil de générateur d'innovation conduirait à limiter les innovations avec les autres électriciens, et que, réciproquement, un profil d'adopteur aurait conduit à les maximiser les résultats des études de cas ne permettent pas d'aboutir à ces conclusions. Il apparaît, ainsi, que RWE est l'électricien qui est le plus engagé dans la démarche de coopération, bien qu'il dispose d'un profil de générateur et qu'Engie est l'électricien le moins engagé bien qu'il dispose d'un profil d'adopteur. Enfin, il apparaît qu'une intensité R&D particulièrement faible permet de distinguer les adopteurs des générateurs d'innovation. Enel, E.ON et Engie sont caractérisés par l'intensité R&D la plus faible de l'ensemble des électriciens étudiés et sont, dans le même temps, des acteurs caractérisés par un modèle d'adopteur d'innovation. Le cas inverse est plus nuancé. EDF, RWE et Iberdrola³⁷⁷ disposent de l'intensité R&D la plus élevée mais EDF et RWE s'inscrivent dans un profil de générateur d'innovation tandis qu'Iberdrola s'inscrit plutôt dans un profil d'adopteur.

³⁷⁷ En moyenne, sur la période 2007 – 2013, Iberdrola et RWE disposaient d'une intensité R&D identique égale à 0,37% du chiffre d'affaires. Cf. Chapitre V, section [1. Comparaison des électriciens](#).

Enfin, alors que les résultats obtenus dans la section consacrée aux domaines technologiques posaient la question de la capacité des brevets à offrir un avantage compétitif, les études de cas des électriciens permettent d'apporter des éléments de réponse nuancés à cette question. Ainsi, il apparaît que bien qu'Engie et E.ON fassent partie des déposants les moins engagés, ce sont des groupes particulièrement présents à l'international, notamment dans les domaines des énergies renouvelables et du nucléaire. En outre, les travaux réalisés mettent en évidence qu'Iberdrola est le leader mondial de l'éolien et cela bien qu'il ait été à l'origine du dépôt d'un nombre de brevets particulièrement faible (en valeur absolue et dans le domaine particulier de l'éolien). Cela signifie que le succès de son développement est plutôt guidé par son savoir-faire plutôt que par sa capacité à générer de l'innovation en interne. A l'opposé, EDF, le leader mondial du nucléaire, est le premier déposant sur ce domaine parmi les électriciens considérés. La mise en œuvre, l'exploitation et la maintenance d'une centrale nucléaire est particulièrement plus complexe que dans le cas des autres domaines technologiques ; ce qui peut justifier que les brevets offrent des avantages compétitifs. Notons enfin qu'EDF et Iberdrola sont les deux premiers électriciens qui consacrent la part la plus importante de leur chiffre d'affaires à l'innovation³⁷⁸ et, cela, alors que le premier dispose d'un profil de générateur d'innovation tandis que le second répond à un profil d'adopteur d'innovation.

³⁷⁸ Sur la période 2007-2013, la part moyenne du chiffre d'affaires consacrée chaque année à Recherche et Développement atteignait 0,7% pour EDF et 0,38% pour Iberdrola.

CONCLUSION GENERALE

Rappel de la démarche

Dans le contexte de la transition énergétique en Europe, les électriciens devront constituer des portefeuilles technologiques bas carbone, ce qui leur nécessite d'acquérir de nouvelles connaissances sur toute une variété de domaines technologiques.

Notre travail de recherche a été consacré à l'analyse des stratégies d'innovation mises en œuvre au niveau des six plus importants électriciens européens (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE) et à l'échelle du secteur. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur deux axes : d'une part l'observation des stratégies technologiques développées et d'autre part celle des stratégies d'acquisition des nouvelles connaissances mises en œuvre.

Les stratégies technologiques en réfèrent à la direction du progrès poursuivie par les opérateurs électriques. Ce travail a permis de mesurer l'intensité de l'engagement des opérateurs électriques dans les innovations bas carbone retenues dans notre périmètre d'analyse et de discerner si leur stratégie s'oriente plutôt vers les technologies d'addition ou celles de substitution. Car la transition européenne actuelle est en rupture avec les précédentes transitions énergétiques de l'ère industrielle, jusqu'alors dominées par un processus d'addition technologique. Et s'inscrit dans une trajectoire unique au monde : l'Europe est en effet la seule à engager un double processus d'addition et de substitution énergétique, le charbon ayant vocation à être remplacé à horizon 2050 (CE, 2011b) par les énergies renouvelables.

Les stratégies d'acquisition des connaissances reflètent la démarche mise en œuvre par les électriciens pour introduire les technologies bas carbone, et en particulier la question cruciale de leur degré d'ouverture. Dans la mesure où les innovations environnementales s'appuient, pour la plupart, sur des connaissances différentes de celles accumulées jusqu'à présent par les électriciens, une démarche d'innovation ouverte (Chesbrough, 2006) devrait faciliter leur acquisition. D'autant plus que les innovations environnementales sont de nature plus systémiques que les innovations classiques (Theyel, 2006; Seuring et Müller, 2008) : étant donné que l'introduction de ces innovations impacte une large variété d'acteurs, collaborer apparaît logiquement comme l'un des facteurs susceptibles de la faciliter. Pour apprécier le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances, trois critères ont été retenus : le niveau de co-construction de l'innovation qui permet d'identifier si l'électricien est plutôt un adopteur ou plutôt un générateur de technologie (Hollanders, 2007), le niveau de coopération qui mesure l'intensité des collaborations avec les compétiteurs dans le but de favoriser la diffusion des connaissances et de définir collectivement les nouveaux standards (Nalebuff et Brandenburger, 1996) et le niveau de collaboration avec les nouveaux entrants qui permet d'apprécier dans quelle mesure les électriciens s'appuient sur des actifs complémentaires (Tripsas, 1997).

Nos travaux ont porté sur l'analyse de cinq domaines technologiques. Certains relèvent de la substitution (énergies renouvelables et hydrogène) et d'autres de l'addition (captage et

stockage du carbone, fission nucléaire, smart grids). Une sélection de technologies qui présente, en outre, l'intérêt de couvrir différents segments de la chaîne de valeur électrique.

Pour analyser la stratégie technologique et la stratégie d'acquisition des connaissances, *nous nous sommes appuyés sur les brevets verts³⁷⁹ déposés par les électriciens retenus entre 2007 et 2013, disponibles dans la base Patstat, et sur les projets menés dans le cadre du 7^{ème} PCRD³⁸⁰ sur la même période, accessibles via la base Cordis*. La combinaison de ces deux proxys de l'innovation permet de :

- *comparer les électriciens sur une base fiable et identique,*
- *mesurer l'intensité de leur engagement dans les cinq domaines technologiques retenus,*
- *mesurer l'intensité des collaborations et donc le niveau d'ouverture de la démarche d'acquisition des connaissances selon les critères retenus,*

Assurément, *la combinaison des brevets et des projets menés à l'occasion du 7^{ème} PCRD ne permet pas d'accéder à la totalité de l'innovation des électriciens*. Car la totalité de la propriété intellectuelle produite par les électriciens n'est pas nécessairement protégée par un brevet. De la même façon, d'autres projets collaboratifs, financés ou non par les pouvoirs publics, sont susceptibles d'être conduits par les électriciens en sus de ceux développés dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Nous ne prétendons donc certainement pas disposer d'une base de données exhaustive pour caractériser les stratégies d'innovation. Néanmoins, les bases Patstat et Cordis nous donnent accès à des sources normées cohérentes en vue d'analyser les stratégies d'innovations selon les axes retenus (stratégie technologique et stratégie d'acquisition des connaissances) et d'établir une comparaison entre électriciens.

Les électriciens ont, au total, déposé 891 brevets sur la période considérée et participé à 152 projets collaboratifs qui associent, au total, 1293 organisations différentes³⁸¹. Cependant, *notre analyse a porté exclusivement sur les projets et les brevets concernant les cinq domaines technologiques étudiés, soit 280 brevets et 126 projets*. Le coût total des projets atteint 1,96 Md€, financé à hauteur de 57% par la Commission européenne.

³⁷⁹ Selon la classification proposée par l'inventaire vert de l'OMPI.

³⁸⁰ Le PCRD est un instrument économique de type « technology push » mis en place par la Commission européenne dans le but de cofinancer des projets d'innovation collaborative et favoriser la création de nouvelles connaissances en réduisant le risque technologique.

³⁸¹ Certaines organisations pouvant participer à plusieurs projets, la somme des partenaires des projets excède ce chiffre.

Des facteurs inhérents au secteur électrique et à ses acteurs justifiant l'approche retenue pour analyser les stratégies d'innovation

En préalable à la présentation des résultats portant sur les stratégies d'innovation, il est utile de rappeler les forces en présence auxquelles le secteur électrique est confronté. La conjugaison des tensions dues à la libéralisation des marchés de l'énergie et de la crise que traverse le secteur a contraint à limiter les capacités de financement des électriciens. En outre, les politiques publiques divergentes menées par les Etats ont conduit à des mix énergétiques qui diffèrent significativement selon les électriciens.

La transition énergétique se déroule dans un contexte où le secteur électrique européen traverse une crise sans précédent, qui questionne la capacité des acteurs à la réaliser. Cette crise trouve son origine dans la diminution de la demande assortie d'une situation de surcapacité des unités de production. Ce dernier phénomène est dû à l'augmentation des capacités renouvelables, stimulée par des tarifs de rachat attractifs (principalement en Italie, en Espagne et en Allemagne). L'injection de l'électricité d'origine renouvelable étant prioritaire dans le réseau, les centrales thermiques sont mécaniquement moins sollicitées, bien qu'elles restent indispensables en période de pointe. En conséquence, plusieurs électriciens connaissent des difficultés qui se traduisent par des résultats négatifs (en 2015, Engie a enregistré une perte de 4,6 Md€ et E.ON une perte de 7 Md€), des dépréciations d'actifs (E.ON et Engie ont chacun subi pour plus de 8,3 Md€ de dépréciation d'actifs en 2015) ou des fermetures de centrales (E.ON ferme cinq centrales à charbon en France, Enel a lancé un « appel à contribution » pour reconvertir des centrales représentant une capacité de 13 000 MW). On peut également mentionner les difficultés que rencontre EDF dans le cadre de sa stratégie d'expansion internationale ou pour financer l'extension de la durée de vie de ses centrales en France. De même, E.ON et RWE ont été contraints de procéder à une scission de leur groupe pour isoler les activités thermiques.

De plus, *la libéralisation des marchés a conduit à limiter les dépenses de R&D des électriciens, ce qui, cumulé à la situation de crise économique qu'ils traversent, interroge la capacité des électriciens à générer en interne l'innovation bas carbone.* Jamasb et Pollit alertaient déjà, en 2006, sur les conséquences de ces réductions susceptibles « d'affecter négativement le développement d'innovation dans le long terme ». Sur la période 2007-2013, l'intensité R&D moyenne, qui mesure le budget R&D rapporté au chiffre d'affaires sur la période considérée, varie de 0,1% pour Enel et E.ON à 0,7% pour EDF, soient des niveaux plutôt bas par rapport à ceux observés avant la libéralisation de l'électricité. En outre, il est intéressant de noter que les ressources des électriciens sont significativement différentes puisqu'elles varient, en valeur relative, d'un facteur 7.

Résultats portants sur la vérification des hypothèses

Nous présentons ici les résultats des travaux portant sur la vérification des quatre hypothèses formulées.

- *Hypothèse 1 : les domaines concernant la substitution technologique font l'objet d'un engagement dans des proportions supérieures à celui des innovations relevant de l'addition technologique.*

A l'échelle du secteur, force est de constater que les technologies relevant de l'addition sont privilégiées aux technologies de substitution. Un résultat qui s'inscrit en ligne avec la théorie de l'accumulation créatrice (Bergek et al, 2013). Par opposition à la notion de « destruction créatrice » (Schumpeter, 1939)³⁸², le concept d'accumulation créatrice s'appuie sur l'idée selon laquelle une entreprise en place innove en capitalisant sur les connaissances existantes et en élargissant son processus de recherche à des sources externes. Notons que ce résultat est en contradiction avec les conclusions d'Horbach (2008) selon lequel le principal facteur d'introduction des innovations environnementales serait celui de la réduction des coûts. Si cette dimension est amenée à jouer un rôle dans le cas du CCS, parce qu'une réglementation contraignante déprécierait la valeur des actifs responsables des émissions (« actifs échoués »), et dans celui des smart grids, qui offrent la possibilité d'économiser de l'énergie à travers une meilleure gestion de la demande, le facteur coût est, à lui seul, insuffisant pour justifier l'engagement constaté dans ces domaines.

- *Hypothèse 2 : une démarche d'acquisition des connaissances plus ouverte est observée dans le cas des technologies de substitution par rapport à celles relevant de l'addition.*

Là encore, on observe que ce sont les technologies d'addition qui se distinguent, et font l'objet d'une démarche d'ouverture plus marquée que les technologies de substitution. Un résultat que l'on peut comprendre ainsi : dans la mesure où le CCS, les smart grids et la fission nucléaire reposent sur des technologies déjà explorées par les électriciens³⁸³, l'introduction d'innovation dans ces domaines peut s'appuyer sur un réseau de partenaires déjà établi alors que dans le cas des technologies de substitution ces réseaux restent encore à constituer.

- *Hypothèse 3 : les électriciens dont l'intensité carbone est la plus élevée font l'objet d'un engagement plus marqué dans les technologies de substitution que les moins émetteurs.*

Contrairement à notre hypothèse, il apparaît que les électriciens les plus dépendants des énergies fossiles (RWE, Enel, E.ON) n'explorent pas les technologies de substitution dans des

³⁸² La destruction créatrice fait référence à la destruction des compétences des entreprises en place et de leur éviction du marché au bénéfice de nouveaux entrants.

³⁸³ La fission est une technologie en service depuis quarante ans, dès l'origine de l'électricité, les réseaux furent au centre du système électrique et les technologies de capture consistent à améliorer des procédés thermiques largement rependus.

proportions supérieures aux électriciens les moins émetteurs en carbone (EDF, Iberdrola, Engie). De fait la plupart des électriciens, à l'exception notable d'E.ON qui met en œuvre une démarche de « destruction créatrice » en cohérence avec sa décision de scinder ses activités thermiques et bas carbone, font montre d'un engagement plus marqué dans les technologies d'addition que dans les technologies de substitution.

- *Hypothèse 4 : les électriciens qui disposent de l'intensité carbone la plus élevée sont ceux qui mettent en œuvre une démarche d'acquisition des nouvelles connaissances plus ouverte.*

Les électriciens les plus émetteurs en carbone sont en effet ceux qui mettent en œuvre la démarche d'ouverture la plus prononcée pour acquérir les nouvelles connaissances. Dans la mesure où ces électriciens sont particulièrement liés aux énergies fossiles, il est essentiel pour eux de s'appuyer sur leur écosystème afin de modifier leur trajectoire technologique.

Résultats portant sur l'analyse du secteur électrique européen

Il ressort de l'analyse des stratégies technologiques que les smart grids et les énergies renouvelables sont les deux priorités technologiques à l'échelle du secteur électrique européen. Un résultat qui s'explique par le caractère plus systémique de ces deux domaines. En transformant la structure de la filière électricité, ces secteurs bouleversent, bien plus que les autres domaines technologiques - qu'ils relèvent de l'addition ou de la substitution -, les équilibres établis et mettent à risque la position stratégique des électriciens :

- Les smart grids sont des domaines systémiques « par nature » (Giordano et al, 2011). L'intégration des NTIC transforme le système électrique en lui permettant de passer d'une simple infrastructure « physique » à une plateforme de marché porteuse d'une variété de services à des utilisateurs hétérogènes (Valocchi et al, 2010). Selon Kiesling (2009), un réseau intelligent est, en effet, « un environnement transactionnel riche, une plateforme de marché, un réseau connectant des producteurs et des consommateurs qui y négocient leur apport mutuel de valeur ».
- Les énergies renouvelables génèrent des « coûts systémiques » supérieurs à ceux des technologies thermiques (OCDE, 2012). L'introduction d'une quantité importante d'énergie renouvelable intermittente engendre des surcoûts pour les réseaux de transport et de distribution, le besoin accru d'un équilibrage à court terme et la nécessité d'une capacité de réserve à long terme. De plus, la priorité sur le réseau donnée à l'injection d'électricité d'origine renouvelable conduit à une crise de surcapacité qui impacte fortement les producteurs les plus dépendants des énergies fossiles.

L'analyse des stratégies d'acquisition des connaissances permet de distinguer des caractéristiques communes aux technologies d'addition, ainsi qu'à celles de substitution.

Tout d'abord un examen attentif des brevets et des projets met en évidence que *les technologies d'addition se distinguent par leur niveau élevé de « Co-construction de l'innovation », tandis qu'à l'opposé, c'est plutôt la génération interne de l'innovation qui caractérise les technologies relevant de la substitution.*

De plus, alors qu'il n'est pas possible de qualifier les technologies d'addition sur la base de la nature des partenaires privilégiés par les électriciens (nouveaux entrants ou compétiteurs), il apparaît que *les technologies de substitution ont en commun le faible niveau de collaboration entre électriciens* dont elles font l'objet.

Dernier constat, *le nombre limité de brevets déposés dans le domaine du CCS.* L'engagement des électriciens dans ce domaine se manifeste principalement par le biais des projets - dont le niveau de coopération est le plus élevé de l'ensemble des domaines étudiés. Il semblerait que *les acteurs souhaitent faciliter la diffusion des connaissances et trouver ensemble une solution au risque « d'actifs échoués » auquel sont exposées leurs centrales thermiques en cas d'augmentation du prix du CO₂*³⁸⁴.

Par ailleurs, la comparaison des énergies renouvelables et des smart grids fait état de différences notables entre les deux, en dépit de leur nature systémique commune, et propose à l'échelle des segments et des filières, des résultats intéressants. Les domaines du véhicule électrique, de la gestion bas carbone des bâtiments (incluant les compteurs intelligents), des énergies des mers et du photovoltaïque ont en partage le grand nombre de brevets déposés et le faible niveau de collaborations entre électriciens dont ils font l'objet. Autant de manifestes de *la volonté des électriciens de limiter la circulation des connaissances et du souci du secteur électrique dans son ensemble de maintenir ou développer des avantages compétitifs sur ces filières.* En revanche, alors qu'on observe que dans certains segments des smart grids tels que le véhicule électrique ou la gestion bas carbone des bâtiments, les collaborations avec les nouveaux entrants sont intenses, ce n'est le cas ni des énergies des mers ni du photovoltaïque. Mais dans un cas comme dans l'autre, il semblerait que *la présence de nouveaux entrants stimule la génération interne de l'innovation*, un résultat en ligne avec les travaux d'Erlinghen et Markard (2012). Cependant, concernant les smart grids, les électriciens sont dans une logique de collaboration avec les nouveaux entrants alors que dans le domaine des énergies renouvelables, les électriciens sont en concurrence plus frontale avec ces acteurs-là.

Résultats portant sur l'analyse des six électriciens étudiés

L'analyse des stratégies technologiques à l'échelle des électriciens est riche d'enseignements sur les priorités et la constitution des portefeuilles technologiques, et révélatrice de la corrélation entre l'intensité R&D et la diversité des technologies explorées.

³⁸⁴ La Commission européenne (2013a) estime que sur le prix de marché de la tonne de CO₂ devrait atteindre 35€ en 2050 et 100€ en 2050.

En premier lieu, elle fait état d'*impasses technologiques*³⁸⁵ *quasi systématiques* : Engie, RWE et Enel ne sont pas engagés dans la fission nucléaire et Enel, Iberdrola et RWE sont absents de l'hydrogène.

Par ailleurs, on observe que *RWE et Enel sont les seuls électriciens à explorer en priorité les smart grids et les énergies renouvelables*. En revanche, *le CCS fait partie des trois premiers domaines explorés pour la majorité des électriciens étudiés* (Engie, Enel, E.ON et RWE) alors qu'il se classait au dernier rang à l'échelle du secteur. Un résultat cohérent avec *l'intensité carbone de ces électriciens, (la plus élevée)*, pour lesquels le CCS est capital puisqu'il leur permet d'augmenter les performances environnementales de leurs centrales thermiques et de minimiser le risque d'actifs échoués en cas d'augmentation conséquente du prix du CO₂.

Autre constat, *le niveau de l'intensité R&D des électriciens ne constitue pas un indicateur pertinent pour apprécier la diversité des domaines explorés par les électriciens à l'aune des brevets et des projets*. A titre d'exemple, alors que RWE dispose d'une intensité R&D parmi les plus élevées des électriciens étudiés, il réalise une impasse technologique dans les domaines de l'hydrogène et du nucléaire. Inversement, E.ON est présent sur l'ensemble des domaines analysés alors qu'il possède l'intensité R&D la plus faible des électriciens étudiés.

Enfin, *le fait que les stratégies technologiques divergent selon les électriciens confirme le caractère évolutionniste du processus de sélection des domaines technologiques*. Dans la mesure où ils évoluent dans des contextes de politiques industrielles et énergétiques dissemblables, les électriciens ne sont pas face aux mêmes enjeux quant à la transition énergétique. Trois facteurs semblent susceptibles d'expliquer les stratégies technologiques, au-delà du caractère plus systémique des énergies renouvelables et des smart grids :

- les électriciens sélectionnent les domaines technologiques sur lesquels ils s'engagent *afin de capitaliser sur leurs avantages compétitifs* (Porter, 1990) lorsqu'ils en disposent.
- les *synergies avec les activités dans lesquelles les électriciens sont engagés permettent d'expliquer leur positionnement technologique*. Par exemple, le fait qu'Engie et E.ON soient significativement impliqués dans la production et la distribution de gaz permet d'expliquer leur engagement, supérieur à celui des autres électriciens, dans le domaine de l'hydrogène.
- le « contexte » dans lequel ils évoluent (Rip et Kemp, 1998; Geels, 2002) justifie la constitution du portefeuille technologique respectif de chaque électricien. Cet environnement comprend, d'une part, les dotations naturelles de leur marché historique, (par exemple, EDF qui dispose du deuxième espace maritime mondial est particulièrement actif dans les énergies des mers) et, d'autre part, l'écosystème

³⁸⁵ Nous rappelons que nos résultats sont adossés aux données utilisées. Il est donc possible qu'un portefeuille technologique soit constitué par les électriciens alors que l'analyse des brevets et des projets met en évidence des phénomènes d'impasse technologique.

industriel dans lequel se meut l'électricien qui favorisera les interactions, l'exploration de nouveaux domaines et encourager la prise de risque des acteurs (par exemple que RWE développe la mobilité bas carbone n'est pas sans rapport avec la place de co-leader mondial de l'industrie automobile allemande).

Concernant l'analyse des stratégies d'acquisition des connaissances, nos résultats ont tout d'abord permis de montrer que *la stratégie technologique ne conditionnait pas la démarche d'acquisition des connaissances*. C'est-à-dire que la direction du progrès technologique prise par l'électricien n'influence pas la manière dont les connaissances sont acquises. A titre d'exemple, RWE s'inscrit dans une démarche d'ouverture relativement peu marquée en comparaison de celle mise en œuvre par les autres électriciens et cela bien qu'il soit principalement tourné vers des technologies d'addition. A l'inverse, E.ON met en œuvre la démarche d'acquisition des connaissances la plus ouverte alors qu'il se distingue des autres électriciens par sa stratégie fléchée vers les technologies de substitution.

De plus, les études de cas ont permis de discerner deux profils distincts: *certain électriciens se caractérisent par un profil dominant de « générateur » d'innovation (EDF et RWE), et d'autres s'inscrivent davantage dans une logique « d'adopteurs d'innovation » (Enel, E.ON, Iberdrola et Engie)* selon la classification d'Hollanders (2007)³⁸⁶. Alors que les premiers sont caractérisés par une proportion élevée de brevets déposés par rapport aux projets menés, symptomatiques de leur volonté de générer en interne l'innovation plutôt que de la co-construire avec des partenaires externes, inversement, pour les seconds, les collaborations avec l'écosystème jouent un rôle plus décisif dans le processus d'innovation que la génération en interne. Notons, enfin, qu'EDF et Iberdrola sont les deux électriciens qui consacrent la part la plus importante de leur chiffre d'affaire à l'innovation, alors qu'ils répondent à deux profils différents ; le niveau respectif de dépenses R&D se révèle donc indépendant du profil d'adopteur ou de générateur de technologie.

L'engagement contraint des électriciens pour générer des innovations entrave-t-il la transition énergétique ?

Ce travail aura permis d'éclairer les stratégies d'innovation au niveau du secteur électrique européen et de ses principaux opérateurs et de tirer des enseignements pour comprendre les positionnements technologiques et l'acquisition des connaissances. Bien qu'il ne faille pas sous-estimer l'usage d'une stratégie basée sur le secret qui conduit les électriciens à conserver les inventions confidentielles, nos travaux ont conduit à conclure, qu'à l'exception de RWE et EDF, les électriciens étaient plutôt des adopteurs d'innovation. En mettant en perspective ce résultat avec les conclusions de Jamasb et Pollit (2006) qui soulignaient que le niveau plutôt bas des dépenses de R&D était susceptible « d'affecter négativement le développement

³⁸⁶ Pour Hollanders (2007), une entreprise est innovante si elle génère (« technology provider ») ou bien si elle adopte (« technology user ») des innovations. Les profils de « générateurs » d'innovation sont caractérisés par le fait qu'ils réalisent des opérations de Recherche et Développement en interne. Ils peuvent déployer directement leur innovation sur le marché ou s'appuyer sur d'autres acteurs pour le faire. En revanche, les adopteurs d'innovation se distinguent par le fait qu'ils n'introduisent pas dans le marché des innovations développées dans leur propre laboratoire mais diffusent celles développées par des tiers.

d'innovation dans le long terme », une interrogation demeure : dans la mesure où une variété d'acteurs interviennent dans l'écosystème des innovations bas carbone (start-up, équipementiers, industriels des TIC, industriels de l'automobile, ...), le niveau des budgets des électriciens consacrés à la R&D constitue sans doute une variable moins déterminante que par le passé. La réponse à cette question mériterait de faire l'objet de travaux complémentaires.

ANNEXES

ANNEXE 1 : HYPOTHESES RETENUES POUR LE CALCUL DU COUT DE L'ELECTRICITE DANS L'ETUDE LAZARD (2014)

		Solar PV						Solar Thermal Tower	
		Units	Rooftop—Residential	Rooftop—C&I	Utility Scale— Crystalline ^(c)	Utility Scale— Thin Film ^(c)		with Storage ^(d)	Fuel Cell
Net Facility Output	MW		0.005	1	10	10		75 – 110	24
EPC Cost	\$/kW		\$3,500 – \$4,500	\$2,500 – \$3,000	\$1,750 – \$1,500	\$1,750 – \$1,500		\$8,750 – \$6,250	\$3,000 – \$7,500
Capital Cost During Construction	\$/kW		included	included	included	included		\$1,050 – \$750	included
Other Owner's Costs	\$/kW		included	included	included	included		included	\$800 – included
Total Capital Cost ^(a)	\$/kW		\$3,500 – \$4,500	\$2,500 – \$3,000	\$1,750 – \$1,500	\$1,750 – \$1,500		\$9,800 – \$7,000	\$3,800 – \$7,500
Fixed O&M	\$/kW-yr		\$25.00 – \$30.00	\$13.00 – \$20.00	\$20.00 – \$13.00	\$20.00 – \$13.00		\$115.00 – \$80.00	—
Variable O&M	\$/MWh		—	—	—	—		—	\$30 – \$50
Heat Rate	Btu/kWh		—	—	—	—		—	7,260 – 6,600
Capacity Factor	%		23% – 20%	23% – 20%	30% – 21%	30% – 21%		80% – 52%	95%
Fuel Price	\$/MMBtu		—	—	—	—		—	\$4.50
Construction Time	Months		3	3	12	12		30	3
Facility Life	Years		20	20	20	20		40	20
CO ₂ Emissions	lb/MMBtu		—	—	—	—		—	0 – 117
Investment Tax Credit ^(b)	%		—	—	—	—		—	—
Production Tax Credit ^(b)	\$/MWh		—	—	—	—		—	—
Levelized Cost of Energy ^(b)	\$/MWh		\$180 – \$265	\$126 – \$177	\$72 – \$86	\$72 – \$86		\$118 – \$130	\$115 – \$176

Source: Lazard estimates.

(a) Includes capitalized financing costs during construction for generation types with over 24 months construction time.

(b) While prior versions of this study have presented LCOE inclusive of the U.S. Federal Investment Tax Credit and Production Tax Credit, Versions 6.0 – 8.0 present LCOE on an unsubsidized basis, except as noted on the page titled “Levelized Cost of Energy—Sensitivity to U.S. Federal Tax Subsidies.”

(c) Low end represents single-axis tracking. High end represents fixed-tilt installation. Assumes 10 MW system in high insolation jurisdiction (e.g., Southwest U.S.). Not directly comparable for baseload. Does not account for differences in heat coefficients, balance-of-system costs or other potential factors which may differ across solar technologies.

(d) Low end represents concentrating solar tower with 18-hour storage capability. High end represents concentrating solar tower with 10-hour storage capability.

	Units	Microturbine	Geothermal	Biomass Direct	Wind	Off-Shore Wind	Battery Storage ^(a)
Net Facility Output	MW	1	30	35	100	210	6
EPC Cost	\$/kW	\$2,300 – \$3,800	\$4,021 – \$6,337	\$2,622 – \$3,497	\$1,100 – \$1,400	\$2,500 – \$4,620	\$500 – \$750
Capital Cost During Construction	\$/kW	included	\$579 – \$913	\$378 – \$503	included	included	included
Other Owner's Costs	\$/kW	included	included	included	\$300 – \$400	\$600 – \$880	included
Total Capital Cost ^(a)	\$/kW	\$2,300 – \$3,800	\$4,600 – \$7,250	\$3,000 – \$4,000	\$1,400 – \$1,800	\$3,100 – \$5,500	\$500 – \$750
Fixed O&M	\$/kW-yr	—	—	\$95.00	\$35.00 – \$40.00	\$60.00 – \$100.00	\$27.50 – \$22.00
Variable O&M	\$/MWh	\$18.00 – \$22.00	\$30.00 – \$40.00	\$15.00	—	\$13.00 – \$18.00	—
Heat Rate	Btu/kWh	10,000 – 12,000	—	14,500	—	—	—
Capacity Factor	%	95%	90% – 80%	85%	52% – 30%	43% – 37%	25% – 25%
Fuel Price	\$/MMBtu	\$4.50	—	\$1.00 – \$2.00	—	—	\$60 ^(c)
Construction Time	Months	3	36	36	12	12	3
Facility Life	Years	20	20	20	20	20	20
CO ₂ Emissions	lb/MMBtu	—	—	—	—	—	—
Investment Tax Credit ^(b)	%	—	—	—	—	—	—
Production Tax Credit ^(b)	\$/MWh	—	—	—	—	—	—
Levelized Cost of Energy ^(b)	\$/MWh	\$102 – \$135	\$89 – \$142	\$87 – \$116	\$37 – \$81	\$110 – \$214	\$265 – \$324

Source: *Lazard estimates.*

(a) Includes capitalized financing costs during construction for generation types with over 24 months construction time.

(b) While prior versions of this study have presented LCOE inclusive of the U.S. Federal Investment Tax Credit and Production Tax Credit, Versions 6.0 – 8.0 present LCOE on an unsubsidized basis, except as noted on the page titled “Levelized Cost of Energy—Sensitivity to U.S. Federal Tax Subsidies.”

(c) Assumes capital costs of \$500 – \$750/KWh for 6 hours of storage capacity, \$60/MWh cost to charge, one full cycle per day (full charge and discharge), efficiency of 75% – 85% and fixed O&M costs of \$22.00 to \$27.50 per KWh installed per year.

	Units	Diesel Generator ^(a)	Gas Peaking	IGCC ^(d)	Nuclear ^(e)	Coal ^(f)	Gas Combined Cycle
Net Facility Output	MW	2	216 - 103	580	1,100	600	550
EPC Cost	\$/kW	\$500 - \$800	\$580 - \$700	\$3,257 - \$6,390	\$3,750 - \$5,250	\$2,027 - \$6,067	\$743 - \$1,004
Capital Cost During Construction	\$/kW	included	included	\$743 - \$1,610	\$1,035 - \$1,449	\$487 - \$1,602	\$107 - \$145
Other Owner's Costs	\$/kW	included	\$220 - \$300	included	\$600 - \$1,500	\$486 - \$731	\$156 - \$170
Total Capital Cost ^(a)	\$/kW	\$500 - \$800	\$800 - \$1,000	\$4,000 - \$8,000	\$5,385 - \$8,199	\$3,000 - \$8,400	\$1,006 - \$1,318
Fixed O&M	\$/kW-yr	\$15.00	\$5.00 - \$25.00	\$62.25 - \$73.00	\$95.00 - \$115.00	\$40.00 - \$80.00	\$6.20 - \$5.50
Variable O&M	\$/MWh	—	\$4.70 - \$7.50	\$7.00 - \$8.50	\$0.25 - \$0.75	\$2.00 - \$5.00	\$3.50 - \$2.00
Heat Rate	Btu/kWh	10,000	10,300 - 9,000	8,800 - 10,520	10,450	8,750 - 12,000	6,700 - 6,900
Capacity Factor	%	95% - 30%	10%	75%	90%	93%	70% - 40%
Fuel Price	\$/MMBtu	\$28.76	\$4.50	\$1.99	\$0.70	\$1.99	\$4.50
Construction Time	Months	3	25	57 - 63	69	60 - 66	36
Facility Life	Years	20	20	40	40	40	20
CO ₂ Emissions	lb/MMBtu	0 - 117	117	169	—	211	117
Investment Tax Credit ^(b)	%	—	—	—	—	—	—
Production Tax Credit ^(b)	\$/MWh	—	—	—	—	—	—
Levelized Cost of Energy ^(b)	\$/MWh	\$297 - \$332	\$179 - \$230	\$102 - \$171	\$92 - \$132	\$66 - \$151	\$61 - \$87

Source: Lazard estimates.

(a) Includes capitalized financing costs during construction for generation types with over 24 months construction time.

(b) While prior versions of this study have presented LCOE inclusive of the U.S. Federal Investment Tax Credit and Production Tax Credit, Versions 6.0 – 8.0 present LCOE on an unsubsidized basis, except as noted on the page titled “Levelized Cost of Energy—Sensitivity to U.S. Federal Tax Subsidies.”

(c) Low end represents continuous operation. High end represents intermittent operation. Assumes diesel price of \$4.00 per gallon.

(d) High end incorporates 90% carbon capture and compression. Does not include cost of storage and transportation.

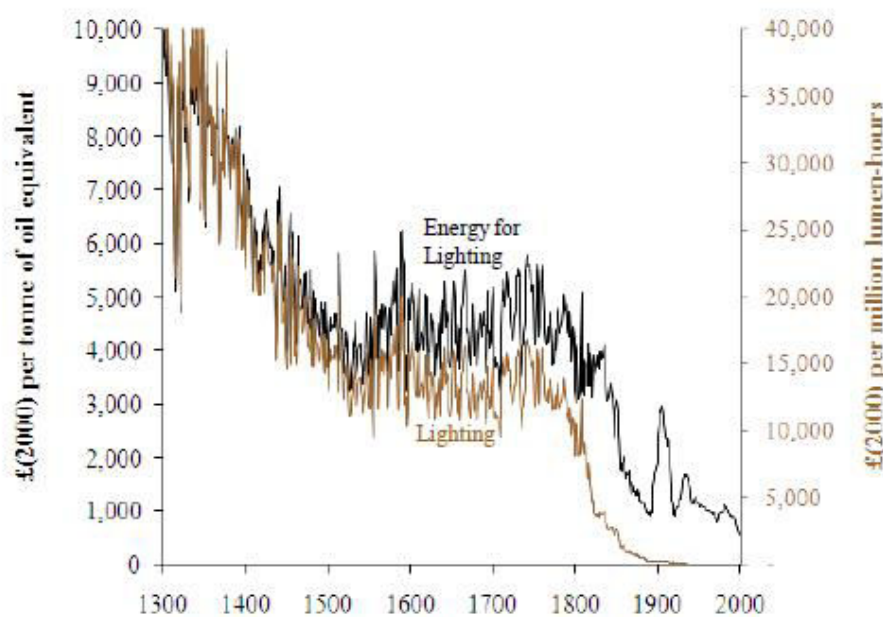
(e) Does not reflect decommissioning costs or potential economic impact of federal loan guarantees or other subsidies.

(f) Based on advanced supercritical pulverized coal. High end incorporates 90% carbon capture and compression. Does not include cost of storage and transportation.

ANNEXE 2 : LE CAS DE L'ÉCLAIRAGE EN ANGLETERRE - COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DU PRIX DE L'ÉNERGIE A CELUI DE L'ÉCLAIRAGE

Le prix de l'énergie utilisé pour l'éclairage chuta rapidement du XIV^{ème} au XVI^{ème} siècle car les matières premières (le suif ou la graisse d'animal) étaient disponibles en quantité importante.

Figure : Prix de l'énergie pour l'éclairage et du prix de l'éclairage au Royaume Uni (1300-2000)



Source : Fouquet 2010

Une stabilisation des prix a eu lieu entre le XVI^{ème} et XVIII^{ème} siècle suivi d'une légère remontée car la demande a augmenté selon un ordre de grandeur plus important que les approvisionnements. A partir du XIX^{ème} siècle, de nouveaux carburants (gaz de ville, kérosène, puis électricité) furent utilisés. Au début de la transition, dans les années 1820, le gaz de ville par unité d'énergie était plus cher que les bougies faites à base de suif (en moyenne supérieur à 2000£ par tonne équivalent pétrole). Pourtant, la technologie relative à l'éclairage au gaz de ville, consistant à convertir du gaz en éclairage, était deux fois plus efficace que les bougies. En 1850, le gaz de ville par unité d'énergie coûtait la moitié du prix des bougies et était encore plus performant.

En 1900, l'électricité coûtait vingt-cinq fois plus par unité d'énergie que le gaz de ville quand elle a commencé à le remplacer pour l'éclairage. A ce moment-là, l'éclairage électrique était seulement sept fois plus efficace. Comme l'électricité était beaucoup plus chère que le gaz, elle était uniquement utilisée dans les maisons luxueuses, les restaurants et les théâtres, où cette innovation était grandement appréciée (Schivelbusch 1988). En 1930, l'électricité était encore cinq fois plus chère que le gaz mais dix fois plus performante. Ainsi, malgré la chute

rapide du prix des énergies aux XIXème et XXème siècles, il s'est produit une transition vers des carburants plus onéreux mais offrant un coût de l'éclairage plus compétitif.

ANNEXE 3 : PRESENTATION DU PROJET ADVANCED DANS LA BASE CORDIS

Download   

Print 

Booklet 

My booklet (0)

**ADVANCED**
Project reference: 308923
Funded under: [FP7-ENERGY](#)

Active Demand Value ANd Consumers Experiences Discovery

From 2012-12-01 to 2014-11-30, closed project

Project details

Total cost: EUR 4 143 963 EU contribution: EUR 2 720 906 Coordinated in: Italy	Topic(s): ENERGY.2012.7.1.3 - Empowering smart customers to participate in active demand and energy system efficiency Call for proposal: FP7-ENERGY-2012-1-2STAGE See other projects for this call Funding scheme: CP - Collaborative project (generic)
--	---

Objective

Active Demand (AD) has the potential to contribute to solving the challenges of electricity systems and offers significant benefits to consumers. There are only few real AD programmes being implemented in Europe and the results of AD pilots are rather fragmented. AD is considered one of the largest untapped energy resources. The main reason behind it is insufficient consumer awareness regarding their own energy consumption and the benefits of altering it in line with the network constraints. T...

Related information

Result In Brief

[Extolling virtues of cost-effective products and services for electricity consumers](#)

Report Summaries

[Final Report Summary - ADVANCED \(Active Demand Value ANd Consumers Experiences Discovery\)](#)
[Periodic Report Summary 1 - ADVANCED \(Active Demand Value ANd Consumers Experiences Discovery\)](#)
[Periodic Report Summary 2 - ADVANCED \(Active Demand Value ANd Consumers Experiences Discovery\)](#)

Coordinator

ENEL DISTRIBUZIONE S.P.A. Italy 

Participants

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS Spain 

ANNEXE 4 : LISTE DES FILIALES DES ELECTRICIENS A PARTIR DESQUELLES LES PROJETS ONT ETE COLLECTES

Enel	EDF	Engie
ENEL DISTRIBUTIE DOBROGEA SA ENEL DISTRIBUZIONE S.P.A. ENEL GREEN POWER ENEL INGEGNERIA E INNOVAZIONE SPA ENEL INGEGNERIA E RICERCA SPA ENEL PRODUZIONE. S.P.A. ENEL.SI SRL	ELECTRICITE DE FRANCE S.A. ELECTRICITE RESEAU DISTRIBUTION FRANCE ELECTRICITY SUPPLY BOARD RTE EDF TRANSPORT SA RTE INTERNATIONAL RTE RESEAU DE TRANSPORT D'ELECTRICITE SA	GDF SUEZ GDF SUEZ ENERGY ROMANIA SA GDF SUEZ MARKETING LTD

E.ON	Iberdrola	RWE
E. ON RUHRGAS AG E.ON AG E.ON BENELUX NV E.ON ENGINEERING GMBH E.ON ENGINEERING LTD E.ON GAS STORAGE GMBH E.ON KERNKRAFT GMBH E.ON NEW BUILD & TECHNOLOGY LIMITED E.ON SERVICIOS SL E.ON SVERIGE AB E.ON UK PLC	IBERDROLA DISTRIBUCION ELECTRICA, S.A. IBERDROLA GENERACION SAU IBERDROLA INGENIERIA Y CONSTRUCCION SA IBERDROLA RENOVABLES ENERGIA SA IBERDROLA RENOVABLES S.A. IBERDROLA SA	RWE DEA AG RWE DEUTSCHLAND AG RWE DEUTSCHLAND AKTIENGESELLSCHAFT RWE EFFIZIENZ GMBH RWE ENERGY AG RWE INNOGY GMBH RWE NPOWER PLC RWE POWER AG RWE RHEIN-RUHR NETZSERVICE

ANNEXE 5 : LISTE DES DEPOSANTS A PARTIR DESQUELS LES BREVETS ONT ETE EXTRAITS DE LA BASE CORDIS

E.ON	EDF	Enel
E.ON ANLAGENSERVICE GMBH	EDF ENERGIES NOUVELLES S.A.	ENEL DISTRIBUZIONE S. P. A.
E.ON Avacon AG	EDF ENR PWT	Enel Distribuzione S.p.A.
E.ON Bioerdgas GmbH	Electricité de France	ENEL DISTRIBUZIONE S.P.A.*
E.ON EDIS AG	Electricité de France (EDF)	ENEL DISTRIBUZIONE SPA
E.ON Engineering GmbH	Electricité de France, Société Anonyme	ENEL GREEN POWER S.P.A.
E.ON ES SVERIGE AB	Electricite De France	ENEL INGEGNERIA E INNOVAZIONE S.P.A.
E.ON KRAFTWERKE GMBH	ELECTRICITE DE FRANCE (FR)	ENEL INGEGNERIA E RICERCA S.P.A.
E.ON New Build & Technology GmbH	ELECTRICITE DE FRANCE FRECH LIMITED COMPANY	ENEL PRODUZIONE S.P.A.
E.ON NEW BUILD AND TECHNOLOGY LIMITED	ELECTRICITE DE FRANCE- SERVICE NATIONAL	ENEL SOLE S. R. L.
E.ON RUHRGAS AG	ELECTRICITE DE FRANCE-SERVICE NATIONAL	ENEL SOLE S.R.L.
E.On Sverige AB	RTE EDF TRANSPORT	
E.ON Wasserkraft GmbH		

Engie	Iberdrola	RWE
GAZ DE FRANCE	IBERDROLA INGENIERIA Y CONSTRUCCION, S. A. U.	RWE AG
GDF SUEHTS	IBERDROLA, S.A	RWE Dea AG
GDF SUEZ		RWE Deutschland AG
GDF SUEZ.		RWE Effizienz GmbH
		RWE GENERATION SE
		RWE Innogy GmbH
		RWE POWER AG
		RWE Power Aktiengesellschaft
		RWE Rheinland Westfalen Netz AG
		RWE Rhein-Ruhr Netzservice GmbH
		RWE Technology GmbH
		RWE Westfalen-Weser-Ems Netzservice GmbH

ANNEXE 6 : PRINCIPAUX DEPOSANTS DE BREVETS DANS LES DOMAINES TECHNOLOGIQUES ETUDIES (HORS NUCLEAIRE)

Technologie :	Capture du carbone				Technologie :	solaire thermique		
Période :	1998-2007				Période :	2006-2011		
Source :	Unep, EPO, ICTSD, 2010				Source :	Wipo, 2014		
Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur		Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur
1	Praxair	Grand compte	Gaz industriel		1	Hikeen Tech co Ltd	Grand compte	Electronique
2	Air Liquide	Grand compte	Gaz industriel		2	Beijing Inst	Centre de recherche	-
3	Air Product	Grand compte	Gaz industriel		3	Paradigma	PME	Pure player du chauffage
4	BOC (Linde Groupe)	Grand compte	Gaz industriel		4	Univ Southeast	Centre de recherche	-
5	SHELL	Grand compte	Pétrole		5	Himin Co Ltd	Grand compte	Pure player du solaire
6	Mitsubishi	Grand compte	Industriel diversifié		6	Siemens	Grand compte	Industriel diversifié
7	EXXON	Grand compte	Pétrole		7	Bosch Gmbh	Grand compte	Industriel diversifié
8	CECA (Arkema)	Grand compte	Gaz industriel		8	Yangzhou	PME	Pure player du solaire
9	General Electric	Grand compte	Industriel diversifié		9	Mitsubishi	Grand compte	Industriel diversifié
10	Institut Français du Pétrole	Centre de recherche	N/A		10	Beijing Wisword Science & technologie	PME	Pure player du solaire
Technologie :	solaire photovoltaïque				Technologie :	éolien		
Période :	2006-2011				Période :	2006-2011		
Source :	Wipo, 2014				Source :	Wipo, 2014		
Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur		Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur
1	LG	Grand compte	Industriel diversifié		1	General Electric	Grand compte	Industriel diversifié
2	Mitsubishi	Grand compte	Industriel diversifié		2	Siemens	Grand compte	Industriel diversifié
3	Sharp	Grand compte	Electronique		3	Mitsubishi	Grand compte	Industriel diversifié
4	Panasonic	Grand compte	Electronique		4	Vestas	Grand compte	Pure player de l'éolien
5	Samsung	Grand compte	Industriel diversifié		5	Suzion Energy (Repower Systems)	Grand compte	Pure player de l'éolien
6	Kyocera Corp	Grand compte	Electronique		6	Samsung	Grand compte	Industriel diversifié
7	Kyocera Minolta	Grand compte	Electronique		7	Sinovel wind group	Grand compte	Pure player de l'éolien
8	Fujifilm Corp	Grand compte	Electronique		8	Nordex Energy	Grand compte	Pure player de l'éolien
9	Hitachi	Grand compte	Electronique		9	Gamesa	Grand compte	Pure player de l'éolien
10	Hyundai	Grand compte	Industriel diversifié		10	Bosch	Grand compte	Industriel diversifié

<u>Technologie</u>	Smart Grids				<u>Technologie</u>	Hydrogène et pile à combustibles		
<u>Période</u>	1993-2012				<u>Période</u>	2011-2012*		
<u>Source</u>	Relecura 2013				<u>Source</u>	Fuell Cell Today, 2013		
					*Une étude réalisée par la WIPO sur les brevets déposés entre 1976 et 2005 met en évidence que les principaux déposants dans le domaine de l'hydrogène sont les secteurs automobiles et de l'électronique			
Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur		Rang #	Compagnie	PME / start up	Secteur
1	ABB	Grand compte	Systèmes électriques		1	Samsung	Grand compte	Industriel diversifié
2	General Electric	Grand compte	Industriel diversifié		2	Honda	Grand compte	Automobile
3	Panasonic Corp	Grand compte	Electronique		3	GM	Grand compte	Automobile
4	Siemens	Grand compte	Industriel diversifié		4	Toyota	Grand compte	Automobile
5	Toshiba	Grand compte	Industriel diversifié		5	Panasonic	Grand compte	Industriel diversifié
6	LG	Grand compte	Electronique		6	Nissan	Grand compte	Automobile
7	Itron	Grand compte	spécialisé dans les compteurs		7	Hitachi	Grand compte	Industriel diversifié
8	Sumitomo	Grand compte	Industriel diversifié		8	Delphi	Grand compte	Automobile
9	Eaton	Grand compte	spécialisé dans les systèmes électri		9	Toshiba	Grand compte	Industriel diversifié
10	Current Tech	Grand compte	IT		10	Daimler	Grand compte	Automobile

ANNEXE 7 : METHODES DE PRODUCTION ET DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE

Les deux principales méthodes de production d'hydrogène sont les suivantes :

Le vaporeformage consiste à faire réagir, à haute température (entre 850 et 900°C) et sous pression (20 à 30 bars), un hydrocarbure léger ou du gaz naturel sur de la vapeur d'eau, en présence d'un catalyseur à base de nickel produisant un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Ce dernier est ensuite isolé pour produire de l'hydrogène. Ce procédé présentant un rendement élevé, d'environ 80 %, permet d'atteindre, en sortie d'une unité de production industrielle, un coût attractif, de l'ordre de 2 €/kg d'hydrogène. Le vaporeformage du gaz naturel émettant une quantité élevée de CO₂ (de l'ordre de 10 kilogramme de CO₂ par kilogramme d'hydrogène), l'intérêt de ce procédé de production apparaît limité dans un contexte de transition énergétique.

Connue depuis la fin du XVIII^{ème} siècle, l'électrolyse de l'eau permet de dissocier chimiquement l'eau (H₂O) en une molécule d'oxygène (O₂) et en une molécule d'hydrogène (H₂), sous l'influence d'un courant électrique continu circulant entre deux électrodes. Depuis sa découverte, ce procédé a fait l'objet de nombreux développements conduisant à trois technologies principales, en fonction du type d'électrolyte, liquide ou solide, séparant les deux électrodes. Il s'agit d'électrolyseurs de type alcalin (technique la plus éprouvée), membrane à échange de proton (PEM) (qui présentent le meilleur rendement, de l'ordre de 75% mais représentent un coût plus élevé) et à électrolyte céramique solide (qui fonctionnent à une température supérieure à 700°C qui permet de réduire leur consommation spécifique d'électricité tout en évitant l'utilisation d'un catalyseur). Avec une part de 4 % dans le monde et de 1 % en France, le procédé de production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau est le second procédé de production d'hydrogène. La différence de coût, qui varie entre 5 et 10 €/kg, en fonction de la taille de l'installation et du prix de l'électricité qui l'alimente, permet d'expliquer ce différentiel.

Trois principales techniques de stockage sont explorées :

- La faible densité volumique de l'hydrogène à température ambiante nécessite un stockage à haute pression, dont la compression ainsi réalisée permet d'atteindre une densité compatible avec les applications embarquées. Ainsi, afin de stocker dans un volume équivalent à celui des réservoirs automobiles actuels les 5 kilogrammes d'hydrogènes nécessaires à un véhicule pour bénéficier d'une autonomie de l'ordre de 500 kilomètres, il s'avère indispensable d'atteindre des pressions de 350 ou 700 bars. Ces valeurs correspondent aux standards adoptés aujourd'hui par la plupart des constructeurs automobiles. Il convient néanmoins de souligner que le stockage de l'hydrogène sous une pression de 700 bars nécessite de mobiliser environ un quart de l'énergie contenue dans l'hydrogène ainsi comprimé. Les efforts de recherche et développement réalisés ont permis de concevoir des réservoirs en matériaux composites renforcés par un enroulement de filaments répondant à ces contraintes de pressions très élevées.

- Le stockage cryogénique de l'hydrogène permet de gagner en densité énergétique, de volume, par rapport au stockage sous pression. Cependant, des pertes énergétiques sont à déplorer: l'énergie, correspondant au tiers de sa valeur énergétique, nécessaire au refroidissement de l'hydrogène à sa température de liquéfaction, ($- 235^{\circ}\text{C}$), et les déperditions, de 1 % à 2 % par jour, résultant de son retour à l'état gazeux.
- Enfin, le stockage de l'hydrogène sous forme solide dans des conditions de température et de pression proches des conditions normales est possible. Certains matériaux ont en effet pour propriété d'absorber (fixer en profondeur) ou d'adsorber (fixer en surface) l'hydrogène de façon réversible, par changement des conditions de température ou de pression. Il s'agit de métaux appelés hydrures et, potentiellement, de nanostructures, telles que les nanotubes de carbone.

BIBLIOGRAPHIE

- Abernathy, W., Utterback, J., 1975, A Dynamic Model of Process and Product Innovation, Omega, volume 3, issue 6, pages 639-656
- Agence Internationale de l'Energie, 2011, Smart Grids Technology Roadmap
- Agence Internationale de l'Energie, 2014a, World Energy Outlook
- Agence Internationale de l'Energie, 2014b, Key World Energy Statistics
- Agence Internationale de l'Energie, 2014c, Tracking clean energy progress
- Agence Internationale de l'Energie, 2015a, World Energy Outlook
- Agence Internationale de l'Energie, 2015b, Energy Technologies Perspectives
- Agence Internationale de l'Energie, 2015c, CO₂ Emissions from fuel combustion
- Agence Internationale de l'Energie, 2015d, Special Report on Energy and climate change
- Agence Internationale de l'Energie, 2015e, Hydrogen and fuel cell Technology roadmap
- Alberola, E., Berghmans, N., 2013, Le secteur électrique en phase 2 de l'EU ETS : moins d'émissions de CO₂ mais toujours autant de charbon, Etude climat de CDC Climat Recherche, n°42
- Allen, R., 2012, Backward into the future: The shift to coal and implications for the next energy transition, Energy Policy, volume 50, pages 17–23
- Allen, R., 1983, Collective invention, Journal of Economic Behavior and Organization, volume 4, issue 1, pages 1–24
- Andersen, M., Foxon, T., 2009, The Greening of Innovation Systems for Eco-innovation - Towards an Evolutionary Climate Mitigation Policy. In Accepted papers - DRUID Summer Conference 2009. DRUID Society
- Ansari, S., Krop, P., 2012, Incumbent performance in the face of a radical innovation: Towards a framework for incumbent challenger dynamics, Research Policy, volume 41, issue 8, pages 1357–1374
- Arrow, K., 1962, The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors, Princeton University Press
- Astley, W., Fombrun, C., 1983, Collective strategy : social ecology of organizational environments, Academy of Management Review, volume 8, issue 4, pages 576-587
- Ambec, S., Lanoie, P., Laurent-Lucchetti, J., Johnstone, N., 2011, Environmental Policy, Innovation and Performance: New Insights on the Porter Hypothesis, Journal of Economics and Management Strategy, volume 20, issue 3, pages 803-842
- Andersen, M., 1999, Trajectory Change through Interorganisational Learning. On the Economic Organisation of the Greening of Industry, Torben Lundsted
- Andersen, M., 2002, Partnership and leadership: building alliances for a sustainable future, de Bruijn et Tukker

- Bauknecht, D., Bruckmann, R., Binda Zane, E., 2012, Integration of electricity from renewables to the electricity grid and to the electricity market – RESINTEGRATION, rapport final pour la DG Energy
- Baumol, W., 1977, *Economic Theory and Operations Analysis*, Prentice-Hall International Series in Management
- Baumol, W., Panzar, J., Willig, R., 1982, *Contestable markets and the theory of industry structure*, Harcourt Brace Jovanovich
- Bayona-Saez, C., Cruz-Cazares, C., Garcia-Marco, T., 2010, R&D strategies and firm innovative performance : a panel data analysis, *International Journal of Innovation Management*, volume 14, issue 6, pages 1013-1045
- Beneito, P., 2006, The innovative performance of in-house and contracted R&D in terms of patents and utility models, *Research Policy*, volume. 35, issue 4, pages 502-517
- Bengtsson, M., Kock, S., 1999, Cooperation and competition in relationships between competitors in business networks, *Journal of Business & Industrial of Business & Industrial Marketing*, volume 14, issue 3, pages 178-193
- Bergek, A., Berggren, C., Magnusson, T., Hobday, M., 2013, Technological discontinuities and the challenge for incumbent firms: destruction, disruption or creative accumulation ? *Research Policy*, volume 42, issue 6-7, pages 1210–1224
- Berstein, 2002, *Oil history*
- Brandenburger, A., Nalebuff, B., 1997, *Co-opetition*, Currency Doubleday
- British Petroleum, 2014, *BP Statistical Review of World energy*
- Brunnermeier, S., Cohen, M., 2003, Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003, volume 45, issue 2, pages 278-293
- Buchner, B., Ellerman, D., 2007, The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Allocation, and Early Results, *Review of environmental economics and policy*, volume 1, issue 1, pages 66-87
- Calel, R., Dechezleprêtre, A., 2016, Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market, *The Review of Economics and Statistics*, volume 98, issue 1, pages 173-191
- Chesbrough, H., 2003, *Open innovation*, Harvard Business School Press
- Christensen, C., 1997, *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press
- Cleantech Group, 2013, *Global Cleantech Innovation & Investment*
- CGSP, 2014, *La crise du secteur électrique européen, Diagnostic et solutions, Rapports et documents*
- Commission européenne, 2007, *Un plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (PLAN SET)*, COM(2007) 723 final
- Commission européenne, 2008, *Energy and climate change – Elements of the final compromise*, Directive 2009/28/EC
- Commission européenne, 2008, *Deux fois 20 pour 2020, Saisir la chance qu'offre le changement climatique*, COM(2008) 30 final
- Commission européenne, 2010, *Énergie 2020, Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre*, COM(2010) 639 final

- Commission européenne, 2011a, Feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050, COM(2011) 885 final
- Commission européenne, 2011b, Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050, COM(2011) 112 final
- Commission européenne, 2013a, EU Energy, transport and GHG Emissions trends to 2050 reference scenario 2013
- Commission européenne, 2013b, R&D Investment in the Technologies of the European Strategic Energy Technology Plan, JRC Scientific and Policy Reports, COM(2013) 253 final
- Commission européenne, 2014, Un cadre d'action en matière de climat et d'énergie pour la période comprise entre 2020 et 2030, COM(2014) 15 final
- Commission européenne, 2015, EU Energy in figures, Statistical pocketbook
- Commission européenne, 2016, The 2015 EU Industrial R&D Investment Scoreboard
- Conseil européen, 2003, Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil
- Conseil européen, 2014, Paquet énergie climat 2030, EUCO 169/14, CO EUR 13, CONCL 5
- Cooper, C., Schendel, D., 1976, Strategic responses to Technological Threats, Business Horizons, volume 19, issue 1, pages 61-69
- Dagnino, G., Le Roy, F., Yami, S., 2007, La dynamique des stratégies de coopération, Revue Française de Gestion, volume 7, issue 176, Pages 87 – 98
- Das, T., Teng, B., 2000, A Resource-Based Theory of Strategic Alliances, Journal of Management, volume 26, issue 1, pages 31-61
- Di Manno, 2014, La transition énergétique, entre histoire politique et politique de l'histoire, communication au groupe de travail n°2 « La transition comme question politique et objet de recherche pour les SHS » de l'Ecole thématique de l'Institut francilien recherche innovation et société
- Dosi, G., 1982, Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinant and direction of technological change, Research Policy, volume 11, issue 3, pages 147-162
- Dyer, J., Singh, H., 1998, The relational view: cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage, Academy of Management Review, volume 23, issue 4, pages 660–679
- Energy Information Administration, 2013, Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States
- ENTSO-E, 2014, L'électricité en Europe
- Erlinghen, S., Markard, J., 2012. Smart grids and the transformation of the electricity sector: ICT firms as potential catalysts for sectoral change, Energy Policy, volume 5, pages 895-906
- Faber, A., Frenken, K., 2008, Models in evolutionary economics and environmental policy: Towards an evolutionary environmental economics, Technological Forecasting and Social Change, volume 76, Issue 4, pages 462-470
- Farhangi, H., Palizban, H., Stanchev, N., Stanciulescu, G., 2012, Communication technologies for BCIT smart microgrid, IEEE

- Foray, D., 2013, Patent-Free Innovation :A Review of Economic Works Including the Analysis of a Recent Work in the Field of Experimental Economic, *Revue Economique*, volume 64, issue 1, pages 9-27
- Fouquet, R., 2011 Divergences in long-run trends in the prices of energy and energy services, *Review of Environmental Economics and Policy*, volume 5, issue 2, pages 196-218
- Fouquet, R., Pearson, J., 2012, Past and prospective energy transitions: Insights from history, *Energy Policy*, volume 50, pages 1–7
- Freeman, C., 1992. *The Economics of Hope : Essays on Technical Change, Economic Growth, and the Environment*, Cengage Learning EMEA
- Fressoz, J.-P., 2012, *L'Apocalypse joyeuse : une histoire du risque technologique*, Seuil
- Fressoz, J.-P., 2013, Pour une histoire désorientée de l'énergie, 25^{ème} Journées Scientifiques de l'Environnement – L'économie verte en question, Feb 2014, Créteil, France. JSE-2014 (04), 2014, Journées Scientifiques de l'Environnement
- Fuel Cell Today, The 2012 Fuel Cell Patent Review
- Geels, F., 2002, Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multilevel perspective and a case study, *Research Policy*, volume 3, issue 8-9, pages 1257-1274
- Geels, F., Hekkert, M. Jacobsson, S., 2008, The dynamics of sustainable innovation journeys: Editorial, *Technology Analysis & Strategic Management*, volume 20, issue 5, pages 521-536
- Geffen, C., Rothenberg, S., 2000, Suppliers and environmental innovation – The automotive paint process, *International Journal of Operations & Production Management*, volume 20, issue 2, pages 166–186
- GIEC, 2013, *The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- Gilfillan, S., 1935, *Inventing the Ship*. Chicago, Follett Publishing
- Giordano, V., Fulli, G., 2012, A business case for Smart Grid technologies: A systemic perspective, *Energy Policy*, volume 40, pages 252–259
- Giordano, V., Gangale, F., Fulli, G., Sanchez-Jimenez, M., 2011, Smart grids projects in Europe : lessons learned and current developments., JRC Reference reports
- Global Wind Energy Council, 2014, *Global Wind statistics 2013*
- Gnyawali, D., Park, B., 2011, Co-opetition between giants : Collaboration with competitors for technological innovation, *Research Policy*, volume 40, issue 5, pages 650-663
- Griliches, Z., 1981, Market value, R&D, and patents, *Economics Letters*, volume 7, issue 2, pages 183-187
- Grubb, M., 2004, *Technology Innovation and Climate Change Policy: An Overview of Issues and Options*. Keio economic studies, volume 41, issue 2, pages 103-132
- Grubb, M., Köhler, J., Anderson, D., 2002, Induced technical change in Energy and environmental modeling: Analytic Approaches and Policy Implications, *Annual Review of Energy and the Environment*, volume 27, pages 271-308
- Grubler, A., 2004, Transitions in energy use, *Encyclopedia of Energy*, volume 6, pages 163–177

- Grubler, A., 2012, Energy transitions research: Insights and cautionary tales, *Energy Policy*, volume 50, pages 8-16
- Grubler, A., Wilson, C., 2011, Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies, *Natural Resources Forum*, volume 35, issue 3, pages 165–184
- Haas, R., Nakicenovic, N., Ajanivic, A., Faber, T., Kranzi, L., Müller, A., Resch, G., 2008, Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies, *Energy Policy*, volume 36, issue 11, pages 4012–4021
- Hatfield, D., Tegarden, F., Echols, A., 2001, Facing the Uncertain Environment from Technological Discontinuities – Hedging as a Technology Strategy, *Journal of High Technology Management Research*, volume 12, issue 1, pages 63-76
- Hill, C., 1990, Cooperation, opportunism and the invisible hands: Implications for transaction cost theory, *Academy of Management Review*, volume 15, issue 3, pages 500-513
- Hollanders, H., 2007, Innovation modes. Evidence on the sector level, Europe Innova Sectoral Innovation Watch deliverable WP4, European Commission
- Hoffert, M., Caldeira, K., Benford, G., Criswell, D., Green, C., Herzog, H., Jain, A., Kheshgi, H., Lackner K., Lewis, J., Lightfoot, H., Manheimer, W., Mankins, J., Mauel M., Perkins, L., Schlesinger, M., Volk, T., Wigley, T., 2002, Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet, *Science*, volume 298, issue 559, pages 981–987
- Horbach, J., 2008, Determinants of Environmental Innovation – New evidence from german panel data sources. *Research Policy*, volume 37, issue 1, pages 163–173
- Hunter, L., 1979, *A History of Industrial Power in the United States, 1780-1930, Volume I: Waterpower in the Century of the Steam Engine*, University Press of Virginia
- Iberdrola, 2014, Innovation report 2011-2013
- IFOP, 2014, Les français, la transition énergétique et les économies d'énergies, sondage pour Energie Perspective
- Jaffe, A., Newell, R., Stavins, R., 2002, Environmental Policy and Technological Change, *Environmental and Resource Economics*, volume 22, issue 1, pages 41-69
- Jamasb, T., Pollitt, M., 2008, Liberalisation and R&D in network industries: The case of the electricity industry, volume 37, issues 6–7, pages 995–1008
- Janssen, M., Jager W., 2002, Stimulating diffusion of green products, *Journal of Evolutionary Economics*, volume 12, issue 3, pages 283-306
- Jevons, W., 1865, *Sur la question du charbon*, Macmillan & Co
- Jäger-Waldau, A., 2014, PV Status Report 2014, European Union, JRC Scientific and Technical Reports
- Kalinowski, L., Pastor, J.-M., 2013, L'hydrogène : vecteur de la transition énergétique, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
- Kemp, R., Arundel, A., 1998, Survey Indicators for Environmental Innovation, IDEA report, STEP Group
- Kuznets, S., 1962, Inventive Activity: Problems of Definition and Measurement, NBER Chapters, in: *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, pages 19-52

- Kiesling, L., 2009, Smart Policies for a Smart Grid: Enabling a Consumer-Oriented Transactive Network, Harvard Electricity Policy Group quarterly workshop
- Lado A., Boyd, N., Hanlon, S., 1997, Competition, cooperation, and the search for economic rents: A syncretic model, *Academy of Management Review*, volume 22, issue 1, pages 110-141
- Lanjouw J., Pakes A., Putnam, J., 1998, How to count patents and value intellectual property: the uses of patent renewal and application data, *Journal of Industrial Economics*, volume 46, issue 4, pages 405-432
- Lazard, 2014, Levelized cost of energy analysis
- Lepetit, M., 2014, Les limites de la croissance, *Histoire de France*
- Lokshin B., Carree M., Belderbos R., 2011, Testing for complementarity in case of multiple practices, *Journal of Productivity Analysis*, volume 35, issue 3, pages 263-269
- MacLaren, M., 1943, The rise of the electrical industry during the nineteenth century, Princeton University Press
- Malerba F., 2002, Sectoral systems of innovation and production, *Research Policy*, volume 31, issue 2, pages 845-859
- Malerba, F., Orsenigo L., 1996, Schumpeterian patterns of innovation, *Journal of Economics*, volume 19, issue 1, pages 47-65
- Malerba F. and Orsenigo L., 1997, Technological regimes and sectoral patterns of innovative activities, *Industrial and Corporate Change*, volume 6, issue 1, pages 83-117
- Malerba, F., Mancusi, M.-L., Montobbio, F., 2007, Innovation, international R&D Spillovers and the sectoral heterogeneity of knowledge flows, KITEs Working Papers 204, KITEs, Centre for Knowledge, Internationalization and Technology Studies, Università Bocconi
- Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S., 2007, Demand, innovation, and the dynamics of market structure: The role of experimental *Journal of Evolutionary Economics*, volume 17, issue 4, pages 371-399
- Madureira, N., 2012, The iron industry energy transition, *Energy Policy*, volume 50, pages 24–34
- Mansfield, E., 1996, Contribution of new technology to the economy, Smith, B., Barfield, C.E. (Eds.), *Technology, R&D, and the Economy*, Brookings Institution and American Enterprise Institute
- Marchietti, C., 1976, On Geoengineering and the CO₂ problem, *Climatic Change*, volume 1, issue 1, pages 59-68
- Maugeri, L., 2006, Two Cheers for Expensive Oil, *Foreign Affairs*
- Mazuir, R., 2009, Rapport au nom de la commission des Affaires étrangères, de la défense et des forces armées sur le projet de loi autorisant la ratification du traité sur le droit des brevets, Annexe au procès-verbal de la séance du 17 mars 2009, Sénat
- Mazzanti, M., Zoboli, R., 2005, The Drivers of Environmental Innovation in Local Manufacturing Systems, *Economia politica*, volume 3, pages 399–438
- MEDDE et I4CE, 2015, Les chiffres clés du climat
- Miotti, L., Sachwald, F., 2003, Co-operative R&D: Why and with whom? An integrated framework of analysis. *Research Policy*, volume 32, issue 8, pages 1481–1499
- Müller, M., Seuring, S., 2008, From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management, *Journal of Cleaner Production*, volume 16, issue 15, pages 1699–1710

Nations-Unies, Convention Cadre sur les changements climatiques, 2015, Accord de Paris, FCCC/CP/2015/L.9

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide

Nelson, R., Winter S., 1982, An evolutionary theory of economic change, The Belknap Press of Harvard University Press

Nordhaus, W., 1997, Economic and Policy Issues in Climate Change, Resources for the Future Press

Nordhaus, W., 2011, Designing a friendly space for technological change to slow global warming, Energy Economics, volume 33, issue 4, pages 665-673

Observ'ER, 2015, Etat des énergies renouvelables en Europe

Observ'ER, 2015, Baromètre photovoltaïque

OCDE, 1994, La mesure des activités scientifiques et technologiques. Les données sur les brevets d'invention et leur utilisation comme indicateurs de la science et de la technologie, Manuel brevet

OCDE, 2005, OECD Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technological Innovation Data – Oslo-Manual, third edition

OCDE, AEN, 2012, Energies nucléaires et renouvelables, Effets systémiques dans les réseaux électriques bas carbone

Oltra, V., Saint-Jean, M., 2009, Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry, Technological Forecasting & Social Change, volume 76, issue 4, pages 567–583

Perthuis, C., 2015, Négociation climatique : cesser la course d'escargots grâce au prix du carbone, Chaire Economie du climat

Perthuis, C., Trotignon, R., 2013, Pourquoi et comment redresser le système européen des quotas de CO₂, Série Information et Débat de la chaire Economie du Climat, n°24

Porter, M., 1983, Cases in competitive strategy, The Free Press

Porter, M., van der Linde, C., 1995, Towards a New Conception of the Environmental- Competitiveness Relationship, Journal of Economic Perspectives, volume 9, issue 4, pages 97-118.

Popp, D., 2002, Induced innovation and energy prices. American Economic Review, volume 92, issue 1, pages 160–180

Popp, D., 2005, Using the Triadic Patent Family Database to Study Environmental Innovation, Etudes de l'OCDE

Popp, D., Johnstone, N., Hascic, I., 2010, Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts, Environmental and Resource Economics, volume 45, issue 1, pages 133-155

PwC, 2008 à 2014, Facteur carbone européen : Comparaison des émissions de CO₂ des principaux électriciens européens

PwC, 2012, Delivering Results, Growth and value in a volatile world, 15th Annual Global CEO Survey

Relecura, 2013, Smart Grid Patent Analysis : Landscape & Commercialization

Rennings, K., 2000, Redefining innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics, Ecological Economics, volume 32, issue 2, pages 319-332

- Rip, A., Kemp, R. 1998, Technological Change, in: S. Rayner and Malone, E.L. (eds), Human Choice and Climate Change, Battelle Press, volume 2, pages 327-399
- Rogers, E. 1962, Diffusion of innovation, The Free Press
- Rosenberg, N., 1994, Exploring the Black Box: Technology, Economics, and History, Cambridge University Press
- RTE, 2014, Bilan électrique français, édition 2014
- Schumpeter, J., 1939, Business cycles: a theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process, McGraw-Hill Book Company
- Schurr, H., Netschert, B. 1960, Energy in the American Economy, 1850-1975: an Economic Study of its. History and Prospects Baltimore: The Johns Hopkins University Press
- Smil, V., 2010, Energy Transitions: History, Requirements, Prospects, Praeger
- Smith, N., 1980, The origins of the Water Turbine, Scientific American, volume 242, issue 1, pp 138-148
- Strategic Initiative for Ocean Energy, 2014, Wave and Tidal Energy, Market Deployment, Strategy for Europe
- Sterlaccini, A., 2012, Energy R&D in private and state-owned utilities: An analysis of the major world electric companies, Energy Policy, volume 41, pages 494–506
- Sun, Y., Yonglong, L., Wang, T., Ma, H., He, G., 2008, Pattern of patent-based environmental technology innovation in China, Technological Forecasting and Social Change , volume 75, issue 7, pages 1032-1042
- Teece, D., 1986. Profiting from technological innovation: implications for integration, collaboration, licensing and public policy. Research Policy, volume 15, issue 6, pages 285–305
- Theyel, G., 2006, Customer and supplier relations for environmental performance, Sarkis, J. (Ed), Greening the supply chain. Springer-Verlag, Berlin, pages 139-149
- Tripsas M., 1998, Unraveling the process of creative destruction: complementary assets and incumbent survival in the typesetter industry, Strategic Management Journal, volume 18, issue 1, pages 119–142. **Changer l'année**
- Tushman, M., Anderson, P., 1986, Technological discontinuities and organizational environments, Administrative Science Quarterly, volume 31, issue 3, pages 439-465
- UNEP, EPO and ICTSD, 2010, Patents and clean energy: bridging the gap between evidence and policy
- Unruh, G., 2000, Understanding carbon lock-in, Energy Policy, volume 28, issue 12, Pages 817-830
- Utterback, J., 1994, Mastering the Dynamics of Innovation: How Companies Can Seize Opportunities in the Face of Technological Change, Harvard Business School Press
- Valocchi, M., Juliano, J., Schurr, A., 2010, Switching Perspective—Creating New Business Models for a Changing World of Energy, IBM Institute for Business Value, Executive Report
- Van der Ploeg, F., 2011, Macroeconomics of sustainability transitions: Second-best climate policy, Green Paradox, and renewables subsidies, Environmental Innovation and Societal Transitions, volume 1, issue 1, pages 130–134
- de Vries, F., Withagen, C., 2005, Innovation and Environmental Stringency: The Case of Sulfur Dioxide Abatement, CentER Discussion Paper #2005-18, Tilburg University
- Williamson, O., 1985, The economic institutions of capitalism, The Free Press

Wigley, T., Richels, R., and Edmonds, J., 1996, Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, volume 379, pages 240-243

WIPO, 2014, Patent based technology analysis report, *Alternative Energy Technology*

Yergin, D., 1991, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money & Power*, Simon & Schuster

Résumé

En Europe, la transition énergétique du secteur électrique est unique à la fois d'un point de vue géographique et historique. D'une part, elle s'inscrit dans un double processus d'addition et de substitution technologique. Par ailleurs, elle appelle les électriciens à sortir du paradigme thermique et à mobiliser de nouvelles connaissances pour cela. L'objet de ce travail de recherche est de caractériser les stratégies d'innovation mises en œuvre au niveau des six plus importants groupes électriques européens (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola et RWE) et à l'échelle du secteur. En nous appuyant sur les brevets déposés entre 2007 et 2013 et sur les projets collaboratifs conduits dans le cadre du 7^{ème} PCRD, nous analysons les stratégies technologiques qui concernent la direction du progrès et les stratégies d'acquisition des connaissances qui concernent la démarche mobilisée par les électriciens pour introduire les technologies bas carbone. Nous mettons en évidence qu'à l'échelle du secteur, les technologies d'addition sont privilégiées aux technologies de substitution et que ces dernières font l'objet d'une démarche d'ouverture moins marquée que les technologies d'addition. En outre, il apparaît que les électriciens les plus émetteurs ne sont pas ceux qui mobilisent une stratégie de substitution technologique la plus marquée. En revanche, ils mettent en œuvre une démarche d'ouverture la plus prononcée pour acquérir les nouvelles connaissances.

Mots Clés

transition énergétique, secteur électrique, brevets, stratégies d'innovation, coopération.

Abstract

In Europe, the energy transition of the power sector is unique both from a geographical and historical standpoint. First, it is part of a two-way process of technological addition and substitution. Furthermore, it calls power corporations to exit the thermal paradigm and, in this perspective, gain new knowledge. The purpose of this research work is to characterize the innovation strategies implemented by six of the major European power companies (EDF, Enel, Engie, E.ON, Iberdrola and RWE) and by the industry. Based on the registered patents between 2007 and 2013 and collaborative projects conducted in the framework of the 7th PCRD, we will analyze the technology strategies relating to direction of progress and strategies relating to knowledge acquisition implemented by power companies in order to introduce low carbon technologies. We will highlight that at industry level, addition technologies are favoured in comparison with substitution technologies. We will also demonstrate that the latter shall be less prone to an open approach than addition technologies. Moreover, it seems that power companies with the largest emissions are not those who develop the most significant technology substitution strategy. However, they carry out the most openness based strategy in order to gain new knowledge.

Keywords

energy transition, power sector, patents, innovation strategies, cooperation