



**HAL**  
open science

# La territorialisation des énergies renouvelables en France

Ferdaous Roussafi

► **To cite this version:**

Ferdaous Roussafi. La territorialisation des énergies renouvelables en France. Economies et finances. Normandie Université, 2019. Français. NNT : 2019NORMC045 . tel-02519208

**HAL Id: tel-02519208**

**<https://theses.hal.science/tel-02519208>**

Submitted on 25 Mar 2020

**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.



Normandie Université

## THÈSE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Spécialité SCIENCES ECONOMIQUES**

**Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie**

**La territorialisation des énergies renouvelables en France.**

**Présentée et soutenue par  
Ferdaous ROUSSAFI**

**Thèse soutenue publiquement le 09/12/2019  
devant le jury composé de**

Mme MARIE-ESTELLE BINET	Professeur des universités, Université Grenoble Alpes	Rapporteur du jury
M. FREDERIC LANTZ	Professeur, INST FRANCAIS du PETROLE Rueil Malmaison	Rapporteur du jury
M. RAFIK ABDESSELAM	Professeur des universités, Université Lumière Lyon 2	Président du jury
Mme ISABELLE CADORET	Professeur des universités, Université Rennes 1	Membre du jury

**Thèse dirigée par PATRICIA MAISSANT, Centre de recherche en économie et management (Rennes)**



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE





## **Dédicaces**

Cette thèse est dédiée à mes chers parents qui m'ont encouragée et soutenue tout au long de mon travail de recherche. Sans votre affection et patience je n'aurais jamais pu mener à terme cette thèse. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma chère sœur Chaimae et mon cher frère Mehdi présents dans tous mes moments. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

A mon cher Nabil, en témoignage de l'effort que tu as déployé pour m'aider, me renforcer et me donner de l'espoir, que tu trouves ici l'expression de ma profonde gratitude et affection.

A tous les membres de ma famille, petits et grands, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection.

A la mémoire de mes grands-parents. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

A tous mes amis Kaoutar, Meryem, Ghassen et Moez. En témoignage de l'attachement, de l'amour et de la reconnaissance que je porte pour vous, je vous dédie ce travail.

**Ferdaous**

## Remerciement

Cette thèse est fût pour moi l'occasion de concrétiser tout mon savoir-faire. Je remercie Madame Patricia RENO MAISSANT, ma directrice, pour ses conseils, ses directives et ses orientations. Evidemment, une telle expérience n'aurait pu avoir de réussite, sans votre apport réel et significatif. Je vous remercie, particulièrement, pour la patience que vous avez eue à mon égard et pour le temps que vous m'avez consacré. Veuillez trouver Madame ma profonde gratitude. Merci infiniment.

J'adresse tous mes remerciements à Madame Marie-Estelle BINET et Monsieur Frédéric LANTZ de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Madame Isabelle CADORET et à Monsieur Rafik ABDESSELAM, qui ont bien voulu être examinateurs.

Que tous les membres de jury trouvent ici l'expression de ma reconnaissance d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur Rafik ABDESSELAM pour son aide dans la réalisation du premier chapitre de cette thèse.

Je n'oublie pas mes chers collègues doctorants avec qui j'ai partagé une infinité de discussions et d'activités. Un merci en particulier à Malia avec qui, plus qu'un bureau, on a partagé une belle amitié. Merci de ta compression lors des moments de joie mais aussi dans les moments plus compliqués.

Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

## Résumé

La transition énergétique vers des énergies bas-carbone est aujourd'hui un paradigme dominant des politiques publiques liées à l'énergie. Elle constitue un axe de travail central pour les régions françaises. L'évolution de leur rapport à l'énergie se situe à la fois en situation de filiation avec les expériences européennes et se place dans le sillage d'une incitation nationale à la transition. Cette thèse a pour objectif d'étudier la territorialisation de la production des énergies renouvelables (EnR) selon ses différentes origines (biomasse, solaire, géothermie, éolien et hydraulique). Nous proposons d'évaluer les performances des régions en matière de diversification du bouquet énergétique en 2015 et sur la période 1990-2015. Des méthodes d'analyse de données multidimensionnelles ont été employées. Une typologie des régions françaises caractéristique du développement régional des énergies renouvelables (EnR) en France en 2015 est proposée, elle met en évidence l'émergence de cinq profils types de développement des EnR très contrastés selon les filières d'EnR. L'analyse des données temporelles adoptée pour étudier la dynamique régionale en termes de promotion des EnR sur la période 1990-2015 met en évidence quatre sous-périodes de développement des EnR. La classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur chaque sous-période a mis en exergue cinq types distincts de profils de développement des EnR et une certaine stabilité dans les trajectoires des régions. Cette structure très stable révèle que les disparités entre les régions au début des années 1990 ont persisté tout au long de la période. Enfin, l'étude des déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale a permis d'identifier les principaux leviers favorisant leur déploiement. En effet, nous avons montré à travers l'estimation d'un modèle VECM, qu'à court terme, la croissance économique à la période passée mesurée par le taux de croissance du PIB réel affecte positivement la consommation des EnR, alors que les productions nucléaire et industrielle par habitant ont un impact négatif. A long terme, les estimations des modèles FM-OLS et DOLS indiquent que le niveau de développement de l'économie, mesurée par le logarithme du PIB par habitant impacte positivement la part d'EnR dans la consommation finale d'énergie. Les résultats montrent également que les dépenses en recherche et développement favorisent le recours aux EnR qui dépendent en grande partie de la densité de la population. Enfin, nous montrons qu'à l'échelle régionale, le poids des partis « verts » influence positivement l'essor des EnR.

**Mots-clés** : analyse de données multidimensionnelles, causalité, cointégration, disparités régionales, énergies renouvelables.

## Abstract

The energy transition to low-carbon energy is now a dominant paradigm in energy-related public policies. It is a central focus of work for the French regions. The evolution of their relationship with energy is both in line with European experiences and in the wake of a national incentive for transition. The objective of this thesis is to study the territorialization of renewable energy (RE) production according to its different origins (biomass, solar, geothermal, wind and hydro). We propose to assess the regions' performance in diversifying the energy mix in 2015 and over the period 1990-2015. Multidimensional data analysis methods were used. A typology of French regions characteristic of the regional development of renewable energies (RE) in France in 2015 is proposed, it highlights the emergence of five typical RE development profiles that are highly contrasted according to the RE sectors. The analysis of time series data adopted to study regional dynamics in terms of RE promotion over the period 1990-2015 highlights four sub-periods of RE development. The Hierarchical Ascending Classification (HAC) over each sub-period has highlighted five distinct types of RE development profiles and a certain stability in the trajectories of the regions. This very stable structure shows that disparities between regions in the early 1990s persisted throughout the period. Finally, the study of the determinants of RE consumption at the regional level made it possible to identify the main levers favouring their deployment. Indeed, we have shown through the estimation of a VECM model that in the short term, past economic growth measured by the real GDP growth rate positively affects RE consumption, while nuclear and industrial production per capita have a negative impact. In the long term, estimates from the FM-OLS and DOLS models indicate that the level of economic development, measured by the logarithm of GDP per capita, has a positive impact on the share of RE in final energy consumption. The results also show that research and development spending favours the use of REs, which are largely dependent on population density. Finally, we show that at the regional level, the weight of "green" parties has a positive influence on the development of renewable energies.

**Keywords :** multidimensional data analysis, causality, cointegration, regional disparities, renewable energy.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre introductif : Les énergies renouvelables : motivations, états des lieux et perspectives de développement .....</b>	<b>20</b>
Introduction .....	20
<b>Section 1 : l'indispensable transition énergétique .....</b>	<b>22</b>
1.1 L'accroissement des besoins énergétiques .....	23
1.2 L'avenir des combustibles fossile .....	25
1.3 L'effet de serre .....	28
1.4 Le concept et durée de transition énergétique .....	32
<b>Section 2: Les énergies renouvelables :états des lieux, législation, coût et perspectives de développement.....</b>	<b>36</b>
2.1 Présentation des différentes énergies renouvelables .....	37
2.2 Le marché des énergies renouvelables : évolution des coûts .....	45
2.3 La promotion des énergies renouvelables : instruments de soutien .....	48
2.3.1 Instruments théoriques de soutien aux EnR .....	48
2.3.2 Mise en place des dispositifs de promotion des EnR .....	50
Conclusion.....	52
<b>Chapitre 1 : Performances contrastées du développement des énergies renouvelables dans les régions françaises .....</b>	<b>54</b>
Introduction .....	54
<b>Section 1: Présentation des données .....</b>	<b>57</b>
<b>Section 2 : Les résultats empiriques .....</b>	<b>62</b>
2.1 Typologie du développement des EnR des 22 régions de France métropolitaine.....	63
2.2 Les déterminants du développement territorial des EnR.....	70
2.2.1 Les effets du développement régional des EnR sur les variables thématiques .....	70
2.2.2 Effets discriminants des six thèmes sur le développement régional des EnR .....	72
Conclusion.....	76
<b>Chapitre 2 : Trajectoires du développement régional des EnR dans les régions françaises .....</b>	<b>79</b>
<i>Introduction.....</i>	<i>79</i>



<b>Section 1: Présentation des données</b> .....	80
1.1 Evolution des variables actives sur la période 1990-2015... ..	80
1.2 Disparités régionales en termes de développement des EnR sur la période 1990-2015... ..	86
<b>Section 2: Méthodologie et résultats empiriques</b> .....	90
2.1 Méthodologie .....	90
2.2 Dynamique du développement des EnR sur la période 1990-2015... ..	91
2.3 Trajectoires moyennes du développement régional des EnR sur la période 1990-2015... ..	96
<i>Conclusion</i> .....	101
<b>Chapitre 3 : Les déterminants de la consommation régionale des énergies renouvelables en France</b> .....	104
<i>Introduction</i> .....	104
<b>Section 1 : Revue de littérature</b> .....	107
<b>Section 2 : Données et méthodologie</b> .....	113
2.1 Présentation des données et analyse préliminaire .....	113
2.2 Propriétés des séries .....	116
<b>Section 3 : Résultats économétriques</b> .....	121
3.1 Analyse de long terme.....	121
3.2 Analyse de court terme.....	127
3.2.1 Estimation du modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM).....	127
3.2.2 Tests de causalité.....	129
a) Tests de causalité de Granger sur des séries temporelles régionales.....	129
b) Tests de causalité en Panel.....	133
<i>Conclusion</i> .....	134
<b>Conclusion générale</b> .....	136
<b>Annexes</b> .....	145
<b>Références bibliographiques</b> .....	152

## Liste des Figures

<b>Figure 1:</b> Énergie et histoire du monde.....	23
<b>Figure 2:</b> Groupes de pays par consommation d'énergie primaire, 2000-2013 .....	24
<b>Figure 4 :</b> Répartition géographique des réserves mondiales en énergies fossiles (Gtep), 2015 .....	27
<b>Figure 5 :</b> Evolution des émissions des gaz à effet de serre des plus grandes émettrices (2005-2015).....	30
<b>Figure 6 :</b> Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif », en $Wm^{-2}$ sur la période 1850-2250.....	32
<b>Figure 7 :</b> Évolution de la part d'énergie d'origine non-fossile .....	35
<b>Figure 8:</b> Classement des 5 premiers pays par type et quantité d'EnR en 2015 .....	38
<b>Figure 9:</b> Différences des coûts complets de production des différentes sources de production d'électricité en France .....	47
<b>Figure 10 :</b> Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR en 2015 .....	64
<b>Figure 11 :</b> Répartition des régions françaises selon le développement des ENR en 2015.....	64
<b>Figure 12 :</b> Evolution des productions primaires d'EnR par filière (données agrégées pour la France en Ktep).....	81
<b>Figure 13 :</b> Évolution des parts d'EnR dans la production totale d'électricité et dans la consommation totale d'énergie (moyennes régionales annuelles).....	83
<b>Figure 14 :</b> Évolution des parts des filières d'EnR dans la production totale (moyennes régionales annuelles) .....	84
<b>Figure 15 :</b> Évolution des productions de l'électricité totale, l'électricité renouvelable et l'électricité nucléaire par habitant (moyennes régionales annuelles).....	85
<b>Figure 16:</b> Évolution des consommations de la chaleur renouvelable, des biocarburants et des combustibles fossiles par habitant (moyennes régionales annuelles).....	86
<b>Figure 17:</b> Parts d'EnR dans la consommation finale d'énergie par région (moyenne de 1990 à 2015) .....	88
<b>Figure 18 :</b> Répartition de la production d'électricité renouvelable par source d'énergie (moyenne de 1990 à 2015).....	88
<b>Figure 19:</b> Arbre hiérarchique des années selon le développement des EnR sur la période 1990-2015....	92

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Répartition de la consommation d'énergies primaires en 2017 .....	25
<b>Tableau 2:</b> Disponibilité des réserves fossiles actuelles .....	26
<b>Tableau 3:</b> Potentiel de réchauffement des principaux gaz à effet de serre .....	29
<b>Tableau 4:</b> Scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300 .....	31
<b>Tableau 5:</b> Coût d'une installation photovoltaïque .....	46
<b>Tableau 6 :</b> Caractéristiques du développement des EnR.....	58
<b>Tableau 7 :</b> Statistiques sommaires.....	59
<b>Tableau 8 :</b> Synthèse des résultats des Analyses Discriminantes par thème .....	74
<b>Tableau 9 :</b> Statistiques temporelles sommaires .....	82
<b>Tableau 10 :</b> Statistiques régionales sommaires .....	87
<b>Tableau 11:</b> Partition synthétique en quatre sous-périodes.....	92
<b>Tableau 12:</b> Trajectoires moyennes du développement régional des EnR dans les régions françaises ..	97
<b>Tableau 13 :</b> Résumé des études empiriques sur les liens entre la consommation d'énergie nucléaire, les émissions de CO <sub>2</sub> , la consommation d'énergie renouvelable et la croissance économique .....	108
<b>Tableau 14 :</b> Statistiques descriptives .....	114
<b>Tableau 15 :</b> Variances totales, intra et inter-individuelles.....	115
<b>Tableau 16 :</b> Tests de racine unitaire en panel (première génération) .....	118
<b>Tableau 17 :</b> Test de la dépendance en coupe transversale de Pesaran 2004.....	119
<b>Tableau 18 :</b> Test de racine unitaire de Pesaran (2007) (variables en niveau) .....	120
<b>Tableau 19 :</b> Test de racine unitaire de Pesaran (2007) (variables en différence première).....	120
<b>Tableau 20:</b> Tests de cointégration en panel.....	123
<b>Tableau 21 :</b> Résultats des estimations DOLS et FM-OLS .....	125
<b>Tableau 22:</b> Résultat de l'estimation du modèle VECM.....	128
<b>Tableau 23 :</b> Tests de non-causalité bivariés de Granger.....	132
<b>Tableau 24 :</b> Test de causalité en panel .....	133

## Liste des acronymes et abréviations

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

**AD** : analyse discriminante

**ADEME** : Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie

**AIE** : Agence internationale de l'énergie

**CAH** : Classification Ascendante Hiérarchique

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**DOM** : départements d'outre-mer

**DOLS** : méthode des moindres carrés dynamiques

**DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

**EnR** : énergies renouvelables

**FMOLS** : méthode des moindres carrés complètement modifiés

**G.E.S** : gaz à effet de serre

**GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

**OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques

**SOeS** : Service de l'Observation et des statistiques).

**SRCAE**: schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie

**VECM** : modèle vectoriel à correction d'erreur

## Introduction générale

Toutes les activités humaines, notamment celles qui concourent au développement économique et social, font appel à l'énergie. En effet, le développement d'une société se traduit par la satisfaction croissante d'un certain nombre de besoins : alimentation, éducation, logement, loisirs, santé, transport, etc. L'accès aux services énergétiques modernes est donc indispensable au développement économique et social dans la mesure où toutes les activités humaines nécessitent, à des degrés divers, une utilisation d'énergie finale sous différentes formes (carburants, électricité, etc.).

Cependant, la durabilité du modèle de développement instauré depuis la révolution industrielle est profondément remise en cause en raison du réchauffement climatique et de l'épuisement des ressources fossiles à moyen et long terme. En effet, le réchauffement climatique est généré principalement par les activités humaines qui émettent dans l'atmosphère des émissions de gaz à effet de serre (G.E.S.) dont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le réchauffement climatique génère un double coût, une facture économique assez lourde et une autre environnementale résidant dans l'épuisement des ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel). Face à cette urgence climatique, la nécessité de conduire une transition énergétique rapide et efficace apparaît totalement évidente.

La transition énergétique est le passage du système énergétique actuel basé sur des ressources non renouvelables vers un bouquet énergétique basé principalement sur des ressources renouvelables ; ceci ne sera possible que par le développement de solutions de remplacement des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) et des matières radioactives (uranium, plutonium), qui sont des ressources limitées et non renouvelables (à l'échelle humaine). La transition énergétique prévoit leur remplacement progressif par des sources d'énergies renouvelables pour la quasi-totalité des activités humaines (transports, industries, éclairage, chauffage, etc.).

En d'autres termes, la transition énergétique est définie comme « *le passage qui va nous amener d'un modèle basé aujourd'hui sur les énergies fossiles vers un nouveau modèle énergétique, dans lequel les énergies non carbonées seront dominante* » (Roje, 2008). Il s'agit d'un processus global ne se limitant pas uniquement à l'introduction de nouvelles technologies, mais également à des changements sociaux profonds se rapportant à des modifications dans les législations, les

comportements et les usages. De ce fait l'usage croissant des énergies renouvelables n'est que le premier pas vers une transition énergétique réussie

Au-delà des implications de la transition énergétique en termes de changements de comportements de l'ensemble des acteurs à la fois dans la façon de consommer l'énergie et dans les choix d'investissements, se pose la question du coût économique de cette transition. Constitue-t-elle une solution économiquement pertinente ? Stern (2006) souligne que le coût de l'inaction serait en réalité supérieur à celui des mesures nécessaires pour éviter les dégâts écologiques, la transition écologique ne s'oppose plus à la croissance économique.

La question de l'interdépendance entre la croissance économique et la consommation d'énergie a suscité un intérêt croissant depuis les crises pétrolières des années 70. Elle s'est renforcée avec la prise en compte des enjeux environnementaux et les travaux sur les limites de la croissance. Le concept de croissance économique durable s'est considérablement développé depuis les années 90, cependant ce concept trouve son origine chez les économistes classiques. Malthus et Ricardo, ont été les premiers à envisager la possibilité de limites naturelles à la croissance économique en raison de la croissance rapide de la population et de la raréfaction des ressources naturelles.

Le développement durable et en particulier la transition énergétique ne doivent pas se traduire par une diminution du bien-être, mesuré par le potentiel de consommation de biens marchands et de biens environnementaux par habitant, auquel cas le sentier de croissance ne pourrait pas être considéré comme durable (Haveman, 1989). La relation entre la croissance économique et l'environnement est dès lors de première importance. Concilier le développement économique et la protection de l'environnement paraît a priori contradictoire. En effet, les activités économiques nécessitent l'utilisation de ressources énergétiques et rejettent dans l'environnement des polluants, elles ont donc un impact environnemental négatif. Les politiques en faveur de la protection de l'environnement adossées à des réglementations contraignantes et/ou des mesures fiscales constituent alors un frein à la croissance économique. Cette position se fonde notamment sur la théorie pigouvienne des externalités négatives et du principe pollueur-payeur qui en découle. Cependant, certains auteurs considèrent que les conditions de la croissance peuvent induire une compatibilité entre croissance économique et qualité environnementale (Beckerman, 1992). Plus précisément, l'accès à un certain seuil de développement rendrait « la croissance vertueuse » (Zuindeau, 2005). Plusieurs arguments plaident en faveur de cette vision « optimiste » de la croissance : i) le développement économique et son corollaire la tertiarisation de l'économie

réduisent l'impact environnemental, ii) l'accroissement du niveau d'éducation et du niveau de vie peuvent induire une forte sensibilité aux préoccupations environnementales et modifier les comportements de consommation, enfin iii) l'innovation et le progrès techniques contribuent activement au développement des techniques de dépollution et à la mise en place de technologies propres. La relation croissance économique et environnement de long terme peut être appréhendée à partir de deux approches complémentaires. La première se situe dans le prolongement des travaux de Kuznets (1955), elle a été proposée par Grossman et Krueger (1991). Elle suppose que les émissions de polluants augmentent avec la croissance puis diminuent, formant une relation en forme de « U » inversé. La seconde approche s'inspire du modèle de croissance de Solow (1956), qui stipule l'existence d'un processus de convergence des revenus : Brock et Taylor (2004) étudient la convergence des émissions de polluants.

La transition énergétique et en particulier le développement des EnR doit permettre de relever le défi environnemental contemporain, cependant se pose également la question de la relation entre la croissance économique et les EnR. En effet, en comparaison avec le nucléaire, l'énergie renouvelable est considérée comme une alternative socialement acceptable aux énergies fossiles, cependant s'agit-il d'une alternative économiquement acceptable ? De nombreuses études se sont intéressées à l'analyse des liens dynamiques entre la consommation des EnR et la croissance économique ((Tiwari (2011), Apergis et Danuletiu (2014), Sadorsky (2009))). Leurs résultats confirment que la consommation des EnR favorise la croissance économique qui à son tour stimule le recours aux sources d'énergies renouvelables

Ces résultats légitiment les politiques gouvernementales de développement du secteur des énergies renouvelables. En effet, les ENR peuvent être considérées à la fois comme un facteur de lutte contre le changement climatique, une alternative aux énergies fossiles et au nucléaire et un élément favorisant la croissance économique. Cependant, l'impact de ces énergies sur la croissance est conditionné à la place des EnR dans le mix énergétique et à la mise en place de politiques gouvernementales volontaristes en faveur de leur développement. Les EnR doivent s'inscrire dans le cadre d'une politique de transition énergétique durable dont l'enjeu est double : satisfaire le développement économique et limiter les impacts environnementaux.

A côté d'un cadre technico-économique propice, la transition énergétique suscite un cadre réglementaire favorisant sa réussite. Elle exige une volonté politique forte et une large adhésion de l'opinion à l'échelle planétaire pour aboutir à des lois limitant les émissions de gaz à effet de serre

(GES). Le protocole de Kyoto, signé en 1997, est le premier accord contraignant obligeant les pays qui l'ont ratifié à réduire leurs émissions de GES. L'objectif initial du protocole de Kyoto était de parvenir durant la période 2008-2012 à la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5% par rapport aux niveaux de 1990. Une seconde période d'engagement a été fixée lors du sommet de Doha en décembre 2012. Elle s'étend du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2020. La Conférence sur le climat de Paris, dite « COP21 », qui s'est tenue à Paris en 2015, a permis d'aboutir à un accord historique engageant les 195 pays signataires de cette Convention à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a pour objectif de stabiliser le réchauffement climatique dû aux activités humaines à la surface de la Terre « nettement en dessous » de 2°C d'ici à 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle (1861-1880) et de poursuivre les efforts pour limiter ce réchauffement à 1,5°C.

Le paquet législatif climat-énergie, adopté le 12 décembre 2008 par le Conseil Européen, est le premier plan d'action européen pour la lutte contre le changement climatique. Il s'articulait autour du triple objectif (3x20) pour 2020 : réduire de 20% les émissions de GES par rapport à leurs niveaux de 1990, porter la part des énergies renouvelables à 20% de la consommation et réaliser 20% d'économies d'énergie. Le paquet climat-énergie engage les Etats à prendre les mesures nécessaires afin de les transposer dans leur législation. L'Europe a souhaité donner une réponse forte aux questions d'environnement, de compétitivité et de sécurité d'approvisionnement. L'usage des énergies renouvelables doit permettre à l'union européenne, non seulement de réduire les émissions de GES provenant de la production et de la consommation d'énergie, mais également de réduire sa dépendance vis-à-vis des importations de combustibles fossiles (gaz et pétrole notamment). En effet, afin d'atteindre l'objectif d'une part de 20 % d'énergie provenant de sources renouvelables dans son bouquet énergétique global, l'UE envisage de renforcer les efforts dans les secteurs de l'électricité, du chauffage et du refroidissement ainsi que des biocarburants. Pour ces derniers, elle fixe leur part à 10% dans la consommation totale de carburants à l'horizon de 2020. L'Europe a déjà atteint ses objectifs pour 2020 en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre et l'efficacité énergétique, elle est également sur la bonne voie en ce qui concerne les énergies renouvelables : la part des sources renouvelables a atteint 17,5 % de la consommation finale brute d'énergie de l'UE en 2017. Pour aller encore plus loin dans ce processus, l'UE s'est fixée des objectifs encore plus ambitieux pour 2030 et 2050.

Le Grenelle de l'Environnement, mis en place en 2007, a réuni pour la première fois des représentants de l'Etat, des collectivités territoriales et des représentants de la société civile au sein



de différents groupes de travail afin de créer les conditions favorables à l'émergence en France d'actions en faveur de l'écologie, de l'environnement et de la biodiversité. Deux lois dites « Grenelle I » et « Grenelle II » ont été adoptées en 2009 et 2010, suite à ces consultations. Cinq ans après le Grenelle Environnement, un « débat national sur la transition énergétique » (DNTE) a été initié, aboutissant à l'adoption de la loi de transition énergétique pour la croissance verte (loi n° 2015992) du 17 août 2015. La France s'est fixée comme objectifs principaux de réduire : i) de 40 % les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2030 par rapport à 1990, ii) de 50 % la consommation finale d'énergie en 2050 par rapport à 2012 et iii) de diminuer la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à 2012. Pour ce faire, elle s'est engagée sur l'évolution du mix énergétique : il s'agit de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % en 2030.

La réalisation de tels objectifs ne peut être accomplie sans une participation active des collectivités territoriales et de l'ensemble de leurs compétences. En effet, les collectivités territoriales sont compétentes pour exploiter directement l'énergie provenant de leurs territoires. C'est à la fin des années 2000, avec la prise en compte des enjeux climatiques et environnementaux, que les régions sont devenues des acteurs essentiels de l'environnement et du développement durable. En effet, le Grenelle de l'environnement a cherché à mieux associer les collectivités aux processus de concertation et de planification avec les services déconcentrés de l'État en matière d'énergie et de climat. Il les a dotées de nouveaux outils réglementaires au travers des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) et des schémas régionaux de raccordement au réseau électrique des EnR. Leur cadre d'intervention est ainsi élargi en leur permettant de développer toutes les formes d'énergies renouvelables : éolien, solaire, biomasse et géothermie.

Introduit par l'article 68 de la loi Grenelle II de juillet 2010, le SRCAE est élaboré conjointement avec l'État, après consultation des collectivités territoriales et de leurs groupements concernés. Dans le cadre de ce schéma, les mesures concrètes que peuvent prendre les collectivités territoriales sont de deux ordres : développer la production décentralisée d'énergie et adapter les réseaux à l'arrivée de cette nouvelle production. La collectivité peut favoriser le déploiement des énergies renouvelables sur son territoire en proposant des aides au financement, principalement des subventions. Cependant, l'ampleur des engagements financiers que demandent les objectifs énergétiques et climatiques peut être rédhibitoire. Pour agir sur les investissements, la collectivité peut alors décider de mettre en place des partenariats public-privé, qui lui permettent d'élargir son champ d'intervention sans pour autant réviser son périmètre de compétences. En France, de

nouvelles offres de services énergétiques associant acteurs publics et privés se sont ainsi mises en place, telles que des dispositifs régionaux de prêts bonifiés, les sociétés d'économie mixte (SEM) ou, plus récemment, les sociétés coopératives d'intérêt collectif (SCIC) (Jeulin et Delbosc, 2011).

Cette thèse a pour objectif d'étudier la territorialisation de la production d'EnR selon ses différentes origines (biomasse, solaire, géothermie, éolien et hydraulique). Ce choix est motivé par trois raisons. Premièrement, les technologies de conversion des énergies renouvelables permettent une production décentralisée d'électricité, qui est une des conditions de la territorialisation. Deuxièmement, l'hydroélectricité et les technologies de conversion de l'énergie éolienne sont parfaitement matures, contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque qui est encore en phase de décollage industriel et ne représente qu'une faible part dans le bilan global ; on est donc en présence de dynamiques évolutives qu'il est essentiel d'analyser et de comparer. Troisièmement, en raison de l'indisponibilité des travaux académiques concernant la territorialisation de l'énergie sous ses différentes origines. En effet la plupart des travaux ont concerné l'énergie photovoltaïque tout en omettant les deux autres sources d'énergie.

Les énergies renouvelables sont fortement liées à la notion de territoire puisqu'elles constituent un mode de production énergétique décentralisé valorisant les ressources naturelles locales (soleil, bois, vent, cours d'eau, mer...). La mise en place du « *Plan national de développement des énergies renouvelables de la France* » a impulsé une véritable dynamique de territorialisation des énergies renouvelables. Notons une « *territorialisation anarchique* » et une autre dite de « *territorialisation régulée* ». La première s'est caractérisée par une faible intervention de l'Etat dans les processus décisionnels. Alors que dans la seconde, l'Etat et ses services déconcentrés (D.R.E.AL et Préfectures) ont fait leur retour dans la politique énergétique des territoires grâce à un nouveau cadre juridique. En effet, la France connaît une forte territorialisation régulée caractérisée par une implication complète des acteurs décisionnels dans la politique énergétique, spécialement les communes qui ont un rôle primordial dans le développement des énergies renouvelables sur leur territoire (Duruissseau, 2015).

Nous nous intéressons à la manière dont la territorialisation des énergies renouvelables s'effectue en France, pays à forte tradition étatique centralisatrice. Ainsi, plusieurs interrogations en découlent parmi lesquelles : Quels sont les facteurs de développement et de localisation des équipements des énergies renouvelables sur un territoire donné ? Quelles régions sont en avance par rapport aux autres dans l'offre des énergies renouvelables ? Comment peut-on expliquer historiquement ces

différences en termes de potentiel de production renouvelable ? Quels sont les facteurs explicatifs de ces différences ?

La méthodologie suivie consiste dans un premier temps à établir un état des lieux du développement des énergies renouvelables dans sa dimension régionale. Nous nous proposons d'établir une typologie des régions en fonction de leurs caractéristiques en termes de bilans énergétiques et bilans CO<sub>2</sub> et d'indicateurs socio-économiques. Nous étudions l'évolution (1990-2015) de la part des énergies renouvelables - selon ses différentes origines : biomasse, géothermie, solaire, éolien et hydraulique - dans la production électrique afin d'appréhender les modifications affectant la structure de la production électrique et les efforts régionaux consentis en termes de développement des énergies renouvelables.

Nous collectons des informations liées aux caractéristiques socio-économiques des régions (population, urbanisation, qualification de la population, PIB, investissement, décomposition de la valeur ajoutée, innovations...) ainsi que des informations relatives au climat (ensoleillement, vitesse du vent,...), à la proximité des cours d'eau, à l'importance des marées, à la surface des forêts... Les données sont collectées sur une période relativement longue (26 ans) afin de pouvoir étudier les évolutions temporelles. Ce travail a nécessité la construction d'une base de données quantitatives et qualitatives importantes. Toutes ces informations sont traitées par l'utilisation de méthodes d'analyse des données dans le but d'établir une typologie des régions relativement favorables au développement des énergies renouvelables. Les techniques utilisées seront celles de l'analyse des données multivariées.

L'approche retenue repose sur une analyse de données multidimensionnelle qui prend en compte les caractéristiques définies par les variables sélectionnées. En fonction de la similitude de ces caractéristiques, nous pouvons procéder au regroupement des régions dans le but d'établir une typologie. Les analyses usuelles sur données annuelles ne permettent pas une analyse globale des régions et de leurs caractéristiques, car ces analyses s'effectuent séparément (année par année) et ne prennent pas en compte la possibilité d'avoir une structure commune temporelle. L'évolution globale des régions sera donc étudiée par une analyse temporelle réalisée sur des données agrégées basée sur une analyse pondérée des composantes principales de toutes les données. Cette analyse est spécialement conçue pour étudier des individus - à savoir les régions - caractérisés par un certain nombre de groupes de mêmes variables mesurées à chacun des moments différents dans le temps.

Les résultats de la classification seront utilisés pour sélectionner les variables explicatives du développement des énergies renouvelables et les groupes de régions homogènes par rapport aux variables retenues. Nous pourrions donc envisager de construire un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la consommation d'énergies renouvelables pour l'ensemble des régions. Les techniques envisagées concernent l'économétrie des données de panel (Sevestre, 2002). L'originalité de ce travail est liée à l'échelle régionale retenue pour la modélisation, les travaux réalisés à ce jour concernent uniquement des données nationales (Apergis et Payne, 2010; Sadorsky, 2009; Shafiei et Salim, 2014).

Cette thèse se décline en quatre chapitres. Le chapitre introductif de thèse s'intéresse au contexte de développement des EnR. Nous nous proposons de mettre l'accent sur la nécessité de la transition vers les EnR et de présenter une définition synthétique de chacune de ces sources. La première section du chapitre nous permet de revenir sur les enjeux et les difficultés de la transition énergétique. A cet effet nous proposons une première discussion sur l'accroissement des besoins énergétiques, l'avenir des combustibles fossile et l'émergence du concept de la transition énergétique. Nous présentons dans une deuxième section les différentes sources d'EnR ainsi que les outils de soutien public nécessaires au déploiement des énergies renouvelables compte tenu de leur coût. Nous proposons une analyse théorique des différents instruments à disposition du régulateur et de leur applicabilité dans les régions françaises.

L'objectif du premier chapitre est de proposer un état des lieux du développement des EnR en France en 2015 afin d'évaluer les performances régionales en matière de diversification du bouquet énergétique. Nous établissons une typologie des régions françaises caractéristique du développement régional des EnR afin de mettre en évidence des profils territoriaux différents selon les filières énergétiques, cette typologie est réalisée à partir de données relatives aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie) pour l'année 2015. L'approche adoptée repose sur une complémentarité de méthodes d'analyses de données multidimensionnelles qui tiennent compte des caractéristiques régionales du développement des EnR. Dans un premier temps, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été appliquée sur les facteurs principaux de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) du développement des EnR des 22 régions de France métropolitaine afin de les regrouper en classes de régions homogènes

relativement à leur bouquet énergétique et au développement des EnR. Enfin, deux types d'analyse ont été appliquées afin d'explorer les liens entre la partition des régions d'EnR réalisée et les variables thématiques considérées. La première est bivariée - l'analyse de la variance (ANOVA) -, elle permet d'évaluer l'effet de la variable explicative qualitative type de développement régional des EnR, synthétisé par la partition, sur chaque variable thématique explicative continue. La seconde est multidimensionnelle - l'analyse discriminante (AD) -, elle permet d'évaluer l'effet d'un ensemble de variables thématiques explicatives et continues sur le développement régional des EnR. Six thèmes ont été considérés : environnement, démographie, développement économique, spécialisation sectorielle, climat et géographie, politique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des origines historiques et mécanismes temporels de la transition énergétique. Nous adoptons une approche dynamique dans le but de mieux appréhender les efforts régionaux en termes de promotion des EnR. Nous nous proposons d'utiliser des méthodes d'analyse des données temporelles permettant de prendre en compte la dimension temporelle. Nous étudions le développement régional des EnR sur la période 1990-2015. La dimension temporelle est cruciale en matière d'énergie en raison de l'existence de délais importants entre la décision d'investir dans des équipements, la mise en place de ces équipements et la production d'énergie.

Le troisième et dernier chapitre s'attaque à l'étude des déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale. En effet, la compréhension des déterminants des différences de consommation est un facteur clé pour réussir l'activation des leviers de la politique énergétique au niveau local. Ce chapitre ambitionne de contribuer à la littérature sur les déterminants de la consommation des EnR (Sadorsky (2009), Tiwari (2011), Ben Jebli et Ben Youssef (2013),...). Nous construisons un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la part des EnR dans la consommation finale d'énergie au niveau régional sur la période 1990-2015. Notre échantillon est constitué des 22 régions métropolitaines et des DOM. Notre analyse tient compte de l'hétérogénéité des régions en effectuant des tests de causalité de Granger du modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM) et des tests de causalité en panel (Dumitrescu et Hurlin (2012)). Nous proposons également une analyse d'intégration-cointégration sur panel, en utilisant les méthodes des moindres carrés complètement modifiés (FMOLS) et des moindres carrés dynamiques (DOLS) pour estimer les effets de long terme.

# **Chapitre introductif : Les énergies renouvelables : motivations, états des lieux et perspectives de développement**

## **Introduction**

L'énergie joue un rôle essentiel dans le développement des sociétés humaines. En effet, comme pour tout système physique, le système économique nécessite un approvisionnement continu à des degrés divers en énergie finale sous différentes formes (carburants, électricité, etc.) pour pouvoir satisfaire un nombre croissant de besoins : alimentation, éducation, logement, loisirs, santé, transport, etc. (Roegen, 1971 ; Odum, 1971). De nombreux auteurs ont insisté sur le fait que les combustibles fossiles ont permis aux sociétés de prendre le chemin de l'industrialisation (Stern et Kander, 2012 ; Ayres et Voudouris, 2014). A la suite des chocs pétroliers des années soixante-dix, les pays développés ont pris conscience que leur prospérité économique basée sur l'utilisation intensive de ressources naturelles épuisables était menacée.

Bien que les avantages et les atouts de l'énergie pour notre système économique soient importants et multiples, il est important dans n'importe quelle source d'approvisionnement énergétique d'équilibrer trois facteurs ; la compétitivité, la sécurité d'approvisionnement, l'environnement et le climat. Selon les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie primaire est encore dominée par l'énergie d'origine fossile (le pétrole, le gaz naturel et le charbon) qui représentait environ 85,2% de la consommation en 2017. L'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre (GES) émis par énergies fossiles est la principale cause du réchauffement climatique [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007]. En effet, le problème environnemental le plus important lié à l'utilisation de l'énergie est le changement climatique (Dincer et Rosen, 1999). Selon l'IPCC (2007), la prévention contre les conséquences catastrophiques des changements climatiques nécessite la stabilisation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

A côté des changements climatiques, on note une augmentation exponentielle de la consommation mondiale. En effet, l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2010) prévoit un taux de croissance de la demande énergétique de 1,4% par an d'ici 2035. Par conséquent, la préoccupation de chaque pays, notamment les pays développés (en particulier les pays de l'Union européenne et les États-Unis) est de satisfaire cette demande croissante tout en respectant les stocks existants de ressources fossiles, l'environnement et les engagements pris lors des différentes

conférences sur le climat. L'enjeu est donc double, d'un côté, répondre à une demande croissante de la consommation d'énergie exigée par le développement rapide de l'économie mondiale et de l'autre côté diminuer la consommation des combustibles fossiles qui sont la principale source de GES.

Le développement industriel, basé sur les ressources non renouvelables, est naturellement perçu comme invivable dans la mesure où ces énergies sont être compétitives, mais en termes de sécurité d'approvisionnement et d'impact sur l'environnement et le climat, elles sont fortement critiquées, il est donc impératif de limiter l'utilisation des énergies polluantes et de favoriser le développement d'énergies bas carbone. Les émissions mondiales des six GES couverts par le protocole de Kyoto ont atteint près de 49 milliards de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> en 2010, elles ont augmenté de 80% entre 1970 et 2010, principalement en raison du doublement de la consommation d'énergie dans le monde sur cette période. Le défi est immense : pour limiter le réchauffement climatique à 2°C, les experts du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) estiment que 80 % de l'électricité mondiale devra être bas carbone d'ici 35 ans (contre 30 % aujourd'hui). Parallèlement, la demande d'électricité mondiale devrait doubler, il est donc urgent de développer toutes les technologies bas carbones identifiées par le GIEC: renouvelables, nucléaire.

L'énergie nucléaire apparaît comme une alternative aux défis d'approvisionnement en énergie fossile puisque l'approvisionnement en uranium est bien maîtrisé. De plus, elle ne rejette pas de CO<sub>2</sub> mais seulement de la vapeur d'eau. Cependant, un des principaux problèmes de l'utilisation de cette énergie est celui des déchets nucléaires (transport, stockage) dont la gestion n'est pas à ce jour maîtrisée. Les EnR apparaissent donc comme une alternative possible, avec des atouts indéniables, dont une diminution de l'émission de CO<sub>2</sub> rejeté (Collard, 2015).

L'objectif de ce chapitre, structuré en deux parties, est de mettre l'accent sur la nécessité de la transition vers les EnR et de présenter une définition synthétique de chacune de ces sources. Dans la première section, nous nous proposons de mieux comprendre, les enjeux et les difficultés de la transition énergétique. Nous présentons dans une deuxième section les différentes sources d'EnR ainsi que les outils de soutien public nécessaires au déploiement des énergies renouvelables compte tenu de leur coût.

## Section 1 : L'indispensable transition énergétique

« L'énergie caractérise la capacité à fournir du travail, à donner du mouvement, à modifier la température ou à transformer la matière »<sup>1</sup>. Cette grandeur abstraite et conservative se répartit chaque instant entre diverses formes : cinétique, travail mécanique, électrostatique, chaleur... Produire de l'énergie revient à effectuer des transformations qui la mettent sous une forme utile à la société. On distingue selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), l'énergie primaire et l'énergie finale :

- L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium.
- L'énergie secondaire est toute l'énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire (en particulier électricité d'origine thermique). Il s'agit de la fraction de l'énergie primaire effectivement utilisable par le consommateur.

L'espèce humaine a besoin d'énergie, d'autant plus que la société est dans un état de développement avancé. Cette énergie provient de sources que l'on peut classer en deux catégories principales (Safa, 2012) :

- Les énergies de flux plus connues sous le nom de renouvelables. La Terre est soumise en permanence au rayonnement solaire qui déverse par mètre carré orthogonal à sa direction de propagation une puissance d'environ 1000 W au niveau du sol par temps clair. La puissance reçue par la Terre a pour rôle premier d'entretenir la machine climatique. Directement (les diverses formes d'énergie solaire) ou indirectement (biomasse, éolien, hydraulique), l'humanité prélève une modeste partie de ce flux à son usage.
- Les énergies de stock qui consomment des combustibles chimiques ou nucléaires. Elles exploitent des gisements nichés dans l'écorce terrestre. Les ressources contenues dans le sol ou les océans sont évidemment limités.

---

<sup>1</sup>Brochure du ministère de l'Economie et des Finances, Comprendre pour choisir, 2003

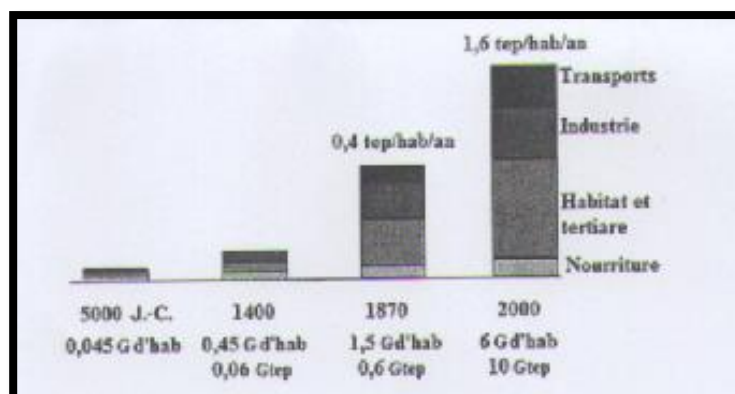


Nous nous proposons dans cette section de mettre l'accent sur l'accroissement des besoins énergétiques et l'avenir des combustibles fossiles ainsi que sur les menaces liées aux émissions de gaz à effet de serre que provoque la consommation de ces combustibles. Nous présenterons ensuite les concepts et durée de la transition énergétique, nous mettrons l'accent sur son caractère à la fois indispensable et difficile.

## 1.1 L'accroissement des besoins énergétiques

L'énergie est indispensable à la vie. Elle est tellement importante qu'une grande partie de l'histoire de l'humanité peut s'écrire en suivant l'évolution des quantités et modes de consommation et de production d'énergie dans le temps, comme le montre la figure 1. De plus, nous pouvons constater que la plupart des conflits récents ont souvent pour origine, plus ou moins directe et évidente, les convoitises que suscitent les zones pétrolières ou gazières et leurs voies d'accès.

**Figure 1:** Énergie et histoire du monde.<sup>2</sup>



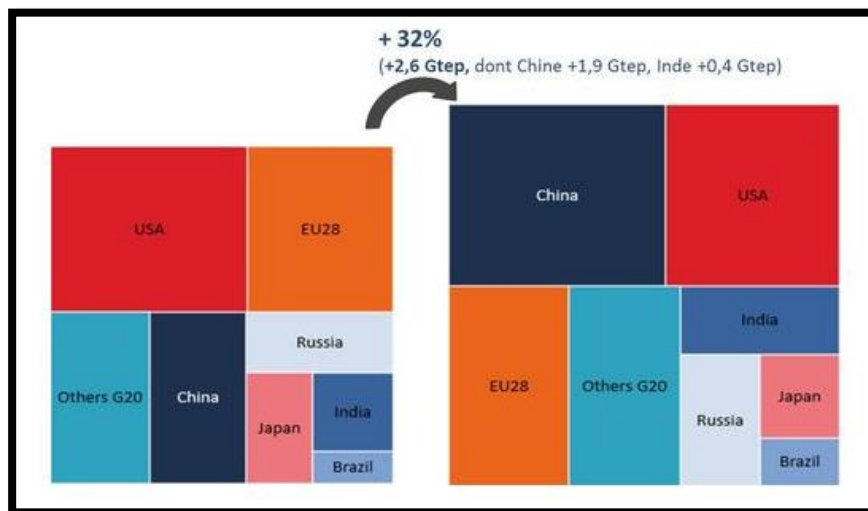
La figure 1 donne une estimation des populations et des productions énergétiques totales par habitant à différents moments de l'histoire. Elle permet clairement de constater que la consommation d'énergie a augmenté avec l'accroissement du nombre d'habitants. Elle met également en évidence l'évolution relative des usages concernant la nourriture (faire cuire la viande, etc.), l'habitat (se chauffer et se protéger des animaux grâce au feu), l'industrie (poterie, métaux, etc.) et les transports, qui n'apparaissent de façon significative que tardivement dans l'histoire sous ce seul aspect énergétique.

<sup>2</sup>Claude Acket, Jacques Vaillant, «*Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives*».

Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, la population mondiale a été multipliée par 3,75 et la production énergétique par 9 pour répondre à l’augmentation de la consommation (Zaninetti, 2012). Ce développement s’est accompagné d’une très forte croissance de la consommation des combustibles fossiles, qui couvrent à ce jour plus de 80 % de nos besoins (Reilly, 2015). Sur les 50 dernières années, la population est passée de 3 à 7 milliards d’habitants, elle a plus que doublé. Les prévisions sont très larges et vont de 10 à 11 milliards pour l’an 2100 selon l’INED (Institut National des Etudes Démographiques). De ce fait, les besoins énergétiques sont amenés à s’amplifier dans le futur et ce dans le but de répondre aux besoins énergétiques des populations actuelles et des besoins des générations futures.

À cette considérable expansion de la population mondiale, s’ajoute le problème de la forte disparité actuelle des consommations énergétiques. Avec 20% de la population mondiale, les pays développés consomment à eux seuls plus de la moitié de l’énergie totale (Acket et Vaillant, 2011). Cet écart va sans doute être résorbé surtout avec la montée des pays émergents comme la Chine et l’Inde. Les besoins énergétiques de notre monde semblent donc devoir croître inexorablement pendant ce siècle. La figure 2 illustre les bouleversements qui ont eu lieu au cours de la période 2000-2013.

**Figure 2:** Groupes de pays par consommation d’énergie primaire, 2000-2013



*Source :* Bilan énergétique mondial 2013

Le graphique ci-dessus permet de mesurer l’impact de la croissance chinoise sur la répartition des productions de richesses dans le monde. A échelle de 13 ans, la Chine est devenue de très loin le premier consommateur dépassant largement l’Union Européenne. L’Inde et la Chine, totalisent, à eux deux, plus du tiers de la population mondiale. Selon l’Agence Internationale de l’Energie

(AIE), la Chine était le deuxième importateur du pétrole en 2018, tandis que l'Inde occupait le quatrième rang avec une demande énergétique qui croît extrêmement vite.

## 12 L'avenir des combustibles fossiles

L'humanité vit depuis les années 1970 dans une civilisation des hydrocarbures dont tout laisse à penser qu'elle n'est pas durable (Safa, 2012). Deux raisons principales à cela :

- Les réserves sont limitées ce qui conduit à l'imminence d'un pic pétrolier (arrêt de la croissance, suivi du déclin prochain de la production) ;
- L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère fait planer la menace d'un changement climatique.

**Tableau 1:** Répartition de la consommation d'énergies primaires en 2017

	<i>Monde</i>		<i>France</i>	
	<i>Consommation (Mtep*/an)</i>	<i>Part (%)</i>	<i>Consommation (Mtep/ an)</i>	<i>Part (%)</i>
<i>Hydrocarbures (pétrole et gaz naturel)</i>	7782,45	57,6	113,75	45,5
<i>Charbon</i>	3729,09	27,6	9,5	3,8
<i>Nucléaire</i>	608	4,5	100,5	40,2
<i>Hydraulique</i>	918,76	6,8	4,25	1,7
<i>Autres renouvelables (éolien, ...)</i>	472,9	3,5	22	8,8
<b>Total</b>	13 511,2	100	250	100

\*Millions de tonnes équivalent pétrole

*Source:* BP statistical review of world energy 2018

En 1997, un an après l'adoption du protocole de Kyoto, 79,6 % de la consommation énergétique mondiale provenait des combustibles fossiles. La consommation mondiale d'énergie primaire a encore reposé à 79% sur les énergies fossiles en 2015 selon les données de l'AIE. Cette part était de 85,2 % en 2017, comme le montre la répartition présentée dans le tableau 1. En France, les combustibles fossiles représentaient seulement, 49,3 % de l'énergie primaire consommée en 2017 en raison du programme électronucléaire.

Les stocks sont aussi bien riches, mais sont menacés au rythme actuel d'exploitation. Le tableau 2 fournit une indication du nombre d'années de production possibles dans les conditions d'exploitation actuelles. La disponibilité des réserves prouvées<sup>3</sup> (quantités d'hydrocarbures extraites d'un réservoir connu) est évaluée par le ratio réserves annuelles divisé par la production annuelle.

**Tableau 2:** Disponibilité des réserves fossiles actuelles<sup>4</sup>

	<b>Ra/Pa*</b>
<b>Pétrole</b>	45 ans
<b>Gaz</b>	65 ans
<b>Charbon</b>	250 ans
<b>Tout fossile</b>	115 ans

(\*Réserves annuelles/Productions annuelles)

Il est clair que les prévisions des réserves prouvées « identifiées » sont incertaines, plus ou moins optimistes et varient selon les estimations publiées. Les écarts peuvent s'expliquer par des raisons techniques, du fait de l'imprécision sur les limites du gisement, de la teneur moyenne du gisement dans le cas des solides et de la fraction récupérable dans le cas des liquides ou des gaz. Les raisons peuvent être également stratégiques, financières, spéculatives et/ou économiques (variant selon les prix de pétrole).

Par ailleurs, on ne peut pas écarter les possibilités de découverte de nouvelles réserves ou d'exploitation de certains gisements restés jusqu'à présent non exploitables en raison d'un retard technique. C'est le cas des gaz et pétroles non conventionnels (Bonnafous et al., 2010). Les gaz non conventionnels recouvrent plusieurs types de ressources renouvelables de gaz naturel. Les deux principales composantes sont le gaz du schiste et le gaz de houille. Ils présentent à eux seuls un potentiel estimé entre 8 000 et 9 000 Tcf ((trillion cubic feet)), soit environ 51 % des ressources gazières mondiales (Total). Les ressources en gaz non conventionnel ont transformé le marché

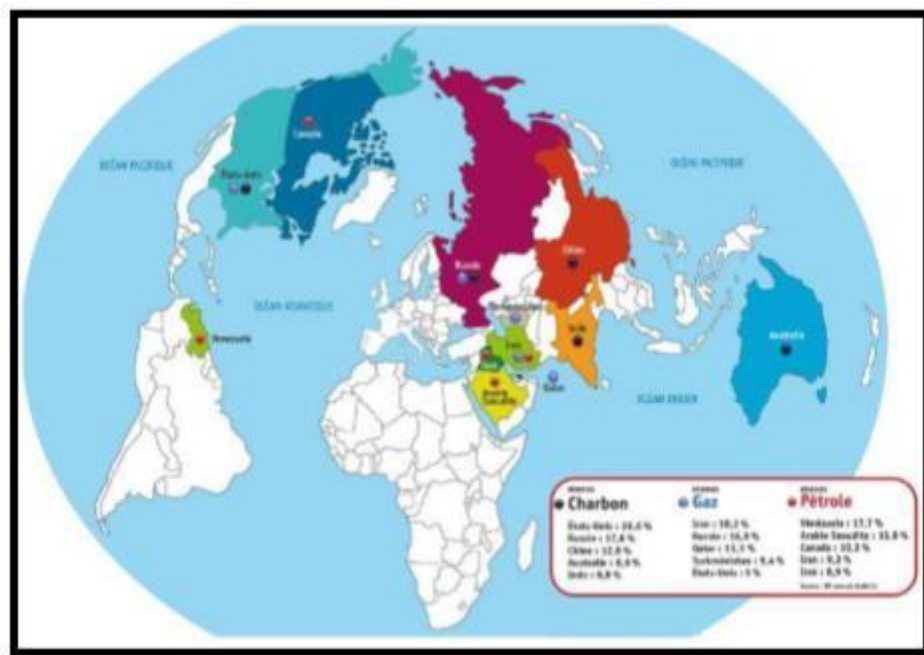
<sup>3</sup>Les réserves prouvées sont à distinguer des réserves ultimes (réserves non extraites, ajoutées à la production dans des Conditions standards) et des réserves probables (quantités d'hydrocarbures qu'on peut espérer extraire d'un réservoir donné).

<sup>4</sup>Claude Acket, Jacques Vaillant, «Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives».

gazier nord-américain, elles sont équivalentes à celles du gaz conventionnel. Le recours à ce type de gaz peut répondre à une demande mondiale croissante en gaz. A côté du gaz de schiste, on trouve les pétroles non conventionnels dont les ressources en place sont considérables, elles sont estimées à environ 500 milliards de tonnes, à comparer à environ 180 milliards de tonnes de réserves prouvées pour le pétrole conventionnel (Jancovici, 2010).

Néanmoins, même si les réserves issues de nouvelles découvertes se multiplient, le ratio réserves annuelles divisé par la production annuelle (Ra/Pa) restera inchangé suite à l'accroissement continu des besoins énergétiques de la population mondiale. A cette baisse inéluctable des réserves d'hydrocarbures à long terme, s'ajoute un risque de crises géopolitiques susceptibles d'aggraver les conséquences d'une pénurie liées à la forte concentration géographique des réserves, principalement pour le pétrole et le gaz naturel. La figure 4 illustre parfaitement ce propos.

**Figure 4:** Répartition géographique des réserves mondiales en énergies fossiles (Gtep), 2015



*Source* : WEC, BP, IFP

Les ressources sont très concentrées dans un nombre limité de pays producteurs qui deviennent, par la rareté des ressources, des pivots dans l'organisation mondiale. Les équilibres de puissance s'en trouvent redistribués. En effet, les ressources en pétrole et gaz se situent essentiellement en ex-

URSS, au Moyen-Orient (Arabie Saoudite, Iran, Irak, Qatar) et au Venezuela. En ce qui concerne les réserves en charbon, elles sont fortement concentrées en Asie, Russie, Amérique du nord et en Australie.

### 13 L'effet de serre

En dépit des pénuries qui se profilent à plus ou moins long terme, la forte dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et surtout vis-à-vis du charbon soulève la question des rejets des GES entraînant une accentuation des menaces liés au changement climatique. Le principal gaz à effet de serre est le gaz carbonique. Sa production se fait lors de la combustion du charbon, pétrole et/ou gaz naturel. En effet, ces combustibles fossiles sont constitués à partir du carbone. Du carbone simple non chimiquement lié dans le cas du charbon, carbone associé à l'hydrogène dans le cas du méthane (gaz naturel) et du carbone ajouté à l'hydrogène et l'oxygène dans le cas du pétrole (Demirdjian, 2005). Lors de la combustion à l'oxygène de l'air, la réaction carbone-oxygène donne du gaz carbonique et la réaction hydrogène-oxygène donne lieu à une production d'eau.

A côté du gaz carbonique, on trouve d'autres gaz à effet de serre, notamment le méthane ( $CH_4$ ), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux ( $N_2O$ ) et 3 substitus de chlorofluorocarbones (halocarbures (*HFC et PFC*) et l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ )). Les activités humaines sont responsables des émissions de ces gaz dans l'atmosphère. En effet, selon AIE, de 1990 à 2010, les émissions mondiales de GES ont augmenté de 30 %, ce qui correspond à une évolution moyenne d'environ +1,5 % par an.

L'impact de ces gaz sur l'effet de serre diffère selon leur pouvoir de réchauffement global (PRG) et du temps qu'ils résident dans l'atmosphère. Le potentiel de réchauffement global d'un gaz, appelé également, l'équivalent  $CO_2$  est la masse de  $CO_2$  qui produirait un impact équivalent sur l'effet de serre.

Cet indicateur sert de moyen de comparaison entre les émissions de chaque gaz à effet de serre. En effet, plutôt que de mesurer les émissions de chaque gaz, on utilise une unité commune : l'équivalent carbone. A titre d'exemple, le méthane a un PRG de 25, ce qui signifie que son pouvoir de réchauffement est 25 fois supérieur au dioxyde de carbone. Autrement dit, sur un siècle, 1 kg de méthane et 25 kg de dioxyde émis de carbone auront le même effet sur l'effet de serre. Le tableau 3 reprend le PRG des principaux gaz à effet de serre.

**Tableau 3:** Potentiel de réchauffement des principaux gaz à effet de serre

<b>Gaz à effet de serre</b>	<b>PRG à 100 ans</b>
<i>CO<sub>2</sub></i>	1
<i>CH<sub>4</sub></i>	25
<i>N<sub>2</sub>O</i>	298
<i>HFC</i>	10900
<i>PFC</i>	7390
<i>SF<sub>6</sub></i>	2280

*Source* : 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC

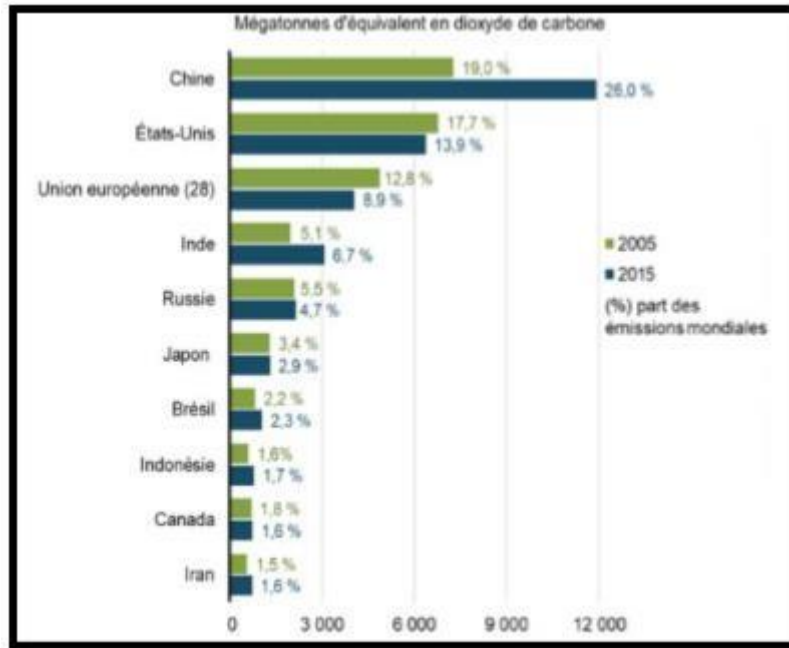
Les trois premiers gaz existent naturellement dans l'atmosphère, ce sont les émissions supplémentaires provenant des activités humaines qui peuvent intensifier l'effet de serre. Les autres gaz sont le résultat des activités industrielles. Le potentiel de réchauffement de ces derniers est largement plus important que celui des trois premiers, ce qui met en évidence la responsabilité de l'activité humaine dans l'intensification de l'effet de serre. Le GIEC<sup>1</sup> estime que sur la période (1970-2010), 78% de la hausse des émissions totales de gaz à effet de serre peuvent être attribuée à l'usage de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz par exemple) et aux procédés industriels. La valeur de ces émissions a atteint en 2010 49 milliards de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> et se répartit de la façon suivante :

- 76% de dioxyde de carbone
- 16% de méthane
- 6% de protoxyde d'azote
- 2% de gaz fluorés

---

<sup>1</sup>Le GIEC est créé en novembre 1988, à la demande du G7 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) dans le but de définir clairement et objectivement les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles en rapport avec la question du changement du climat.

**Figure 5 :** Evolution des émissions de gaz à effet de serre des plus grands émetteurs entre 2005 et 2015



*Source :* World Resources Institute (2017)

Le classement des pays selon le volume des émissions de gaz à effet de serre montre une forte disparité entre pays. En effet, des pays en voie de développement, notamment l'Inde et la Chine ont vu leurs émissions croître alors que d'autres pays développés se sont engagés dans le cadre du protocole de Kyoto dans un processus de réduction des émissions de GES, c'est le cas de l'Union Européenne qui a pu baisser ses émissions de 21% % au cours de la période (2005-2015).

A côté de l'analyse des émissions de GES et de leur impact sur l'effet de serre, le GIEC a également pour mission de prévoir les éventuels changements dans le volume de ces émissions. En effet, le cinquième rapport du GIEC (Novembre 2014) définit quatre scénarios envisageables au 21<sup>ème</sup> siècle. Les premiers scénarios ont été définis par le GIEC en 1990, depuis le contexte socio-économique a sensiblement changé, notamment en raison du développement rapide des pays émergents et la révision à baisse des projections démographiques (de 14 milliards à 10 milliards à 2100).

Ce rapport définit quatre scénarios (tableau 4) au niveau desquels on retrace les projections des émissions de gaz à effet de serre et de la température de la Terre jusqu'en 2300.



**Tableau 4:** Scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif<sup>6</sup> sur la période 2006-2300

Nom	Forçage radiatif <sup>7</sup>	Concentration de GES (en partie par millions : ppm)	Trajectoire
<b>RCP 8.5</b>	>8.5 $Wm^{-2}$ en 2100	>1370 eq- $CO_2$ en 2100	croissante
<b>RCP 6.0</b>	~ 6 $Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq- $CO_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
<b>RCP 4.5</b>	~ 4.5 $Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq- $CO_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
<b>RCP 2.6</b>	Pic à ~ 3 $Wm^{-2}$ avant 2100 puis déclin	Pic ~ 490 eq- $CO_2$ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

*Source :* Moss et al. (Nature, 2010)

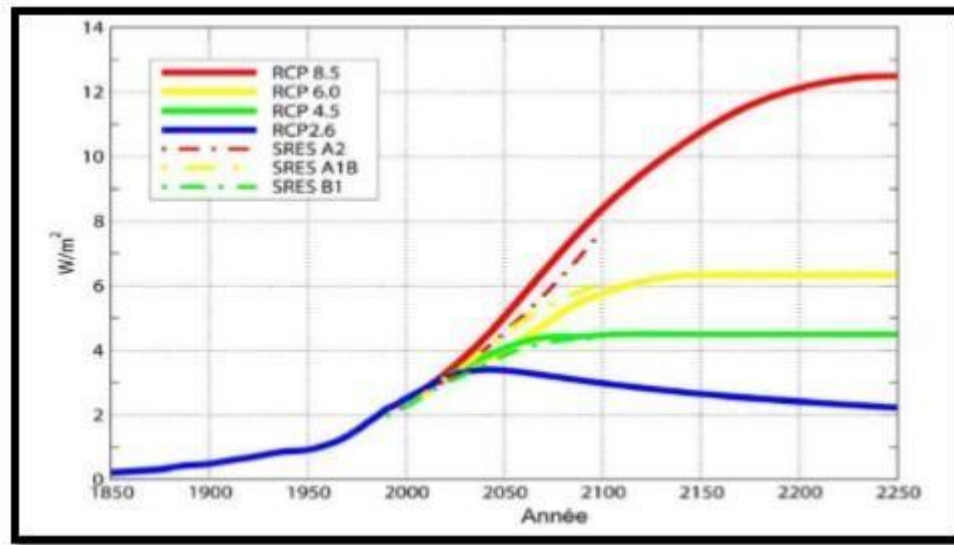
Les quatre scénarios (RCP) correspondent aux « Representative Concentration Pathways ». Ces projections sont regroupées en quatre trajectoires possibles en fonction du profil d'évolution des émissions de GES :

- **RCP 8.5:** C'est le scénario le plus pessimiste ; il correspond à une augmentation continue au rythme actuel des émissions de GES,
- **RCP 6.0:** Ce scénario correspond à la stabilisation des émissions avant la fin du 21<sup>ème</sup> siècle à un niveau moyen,
- **RCP 4.5:** Ce scénario correspond à la stabilisation des émissions avant la fin du 21<sup>ème</sup> siècle à un niveau faible,
- **RCP 2.6:** C'est le scénario le plus optimiste, correspondant au maintien des émissions à un niveau faible.

<sup>6</sup>Le forçage radiatif correspond à la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné. Positif (plus d'énergie reçue qu'émise), il tend à réchauffer le système. Négatif (plus d'énergie émise que reçue), il tend vers un refroidissement

<sup>7</sup> Voir la définition du forçage radiatif en annexes.

**Figure 6:** Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif », en  $Wm^{-2}$  sur la période 1850-2250.



*Source* :5<sup>ème</sup> rapport du GIEC

Après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés correspondent aux anciens scénarios (GIEC, 2001 et 2007). Le RCP 8.5 correspond à une situation où on continuerait d'utiliser uniquement les combustibles fossiles. Le scénario RCP 4.5 fait référence à une situation où le mélange entre les combustibles fossiles et les combustibles non fossiles pourrait bien adoucir l'impact sur le climat sur le long terme. Finalement, la projection la plus optimiste correspond au scénario RCP 2.6 au niveau duquel, on réussit l'objectif de limiter le réchauffement planétaire à 2°C. Cette combinaison de scénarios climatiques et socio-économiques a le mérite de permettre une évaluation des impacts et coûts des différentes politiques climatiques ainsi que d'estimer les conséquences en termes d'usage des sols de chaque politique climatique.

En conclusion, le système économique industrialisé nécessite un approvisionnement continu en énergie, les besoins énergétiques ne cessent d'accroître. Cependant, face au risque de pénurie des ressources fossiles et aux menaces liées au changement climatique, il apparaît essentiel de réduire la consommation énergétique, de limiter l'utilisation des énergies polluantes et de réussir une transition énergétique.

#### **14 Le concept de transition énergétique**

Le concept de transition énergétique est un concept à géométrie variable (De Perthuis, 2013). Aux Etats-Unis, par exemple, la transition énergétique a pour objectif de renforcer l'indépendance

énergétique en réduisant la part importée des hydrocarbures importés depuis le Proche-Orient. Elle justifie donc l'orientation de ce pays vers le développement des technologies des hydrocarbures non conventionnels, notamment, les pétroles non conventionnels et le gaz de schiste.

Pour l'Union Européenne, la transition énergétique signifie la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la promotion des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Toutefois, la réalisation de ces objectifs ambitieux ne peut se faire sans une parfaite coordination entre les États membres. En effet, selon (De Perthuis, 2013) "au nom de la transition énergétique, l'Allemagne quitte le nucléaire<sup>8</sup>, le Royaume-Uni cherche à y revenir, la Pologne à y entrer et la France organise un grand débat citoyen".

Dans les pays émergents, la transition énergétique se fixe comme objectif d'assurer les approvisionnements nécessaires pour répondre aux besoins de l'industrialisation et à la demande massive des ménages devenus de plus en plus riches que ce soit en termes de logement ou de mobilité. Au niveau des pays exportateurs du pétrole, la transition énergétique consiste à utiliser les rentes pétrolières et gazières dans la diversification du système d'approvisionnement énergétique. C'est l'exemple des pays du Golfe richement dotés en ensoleillement et en territoires nus et ventés.

La transition énergétique peut également prendre la forme d'une tarification de l'usage de carbone. Un tel prix est le seul instrument qui permette d'envoyer les bonnes incitations à la fois du côté de la demande (efficacité énergétique et substitution de sources fossiles par des renouvelables) et de l'offre (réorientation des flux d'investissement vers le bas carbone) (De Perthuis, 2013). On est appelé à introduire la notion de la rareté de l'atmosphère exprimée par le prix du droit d'y rejeter du carbone, autrement dit le prix du carbone. Une telle tarification du carbone peut être introduite via des marchés de permis ou via la taxation. Cependant, la généralisation d'une taxe sur les énergies fossiles, directement liée aux émissions de CO<sub>2</sub> n'est facile ni à instaurer, ni à faire accepter par l'opinion. Ce qui est clair, c'est qu'un mécanisme réglementaire est nécessaire pour faire accepter les coûts supplémentaires que nécessite la protection de l'environnement (Roje, 2008). Dans ce cadre, l'Union Européenne peut jouer un rôle extrêmement important en instaurant une politique commune de taxation des activités intensives en carbone dans les 28 pays qui la composent. En agissant ainsi, d'autres régions dans le monde (Amérique du Nord, Asie-Pacifique) peuvent suivre la même voie.

---

<sup>8</sup> La décision de l'Allemagne de quitter le nucléaire est justifiée également par l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima en mars 2011.

Limiter les émissions non seulement du gaz carbonique mais également des autres gaz à effet de serre nécessiterait la conclusion d'accords internationaux fixant des objectifs juridiquement contraignants de réduction des émissions. C'est le cas des accords conclus à l'échelle internationale, pour bannir les composés chlorofluorocarbonés (CFC) (1994), qui étaient utilisés comme aérosols et menaçaient la couche d'ozone.

Les différentes menaces (raréfaction progressive des ressources, accès inégal à l'énergie, tensions sur les approvisionnements et risques de changement climatique) auxquelles notre économie et notre planète font face rendent indispensable et urgente une transition des énergies fossiles aux énergies renouvelables. En effet, selon un rapport intitulé : « Energy (R) Evolution 2015, 100% renewable energy for all »: à l'échelle mondiale, prévoir l'abandon le plus rapidement possible du charbon, du pétrole, du gaz et du nucléaire pour parvenir à 100% d'énergies renouvelables en 2050 nécessite des investissements de 1.600 milliards de dollars (1.400 milliards d'euros) par an d'ici là.

Différentes transitions énergétiques ont eu lieu dans le passé. (Smil, 1994) repère cinq transitions énergétiques qui ont marqué l'histoire des sociétés :

- La domestication du feu (cuisson et chauffage) et fonte de métaux ;
- L'ajout de la traction animale à la force musculaire ;
- L'utilisation massive du charbon à la fin du *XVIII<sup>e</sup>* siècle surtout au Royaume-Uni ;
- Les innovations marquant la fin du *XIX<sup>e</sup>* siècle avec l'installation de l'électricité domestique et la mise au point du moteur à combustion interne fonctionnant à partir de l'essence et de diesel. Cette quatrième transition a permis la mobilisation de trois sources primaires d'énergie (pétrole, charbon et gaz) ;
- Contrairement à ces quatre transitions qui sont le résultat du progrès technologique, la cinquième transition est marquée par la nécessité d'affranchir le système énergétique de son addiction aux trois énergies fossiles traditionnellement dominantes (charbon, pétrole et gaz). Cette transition est imposée et son point d'arrivée sera un système bas-carbone.

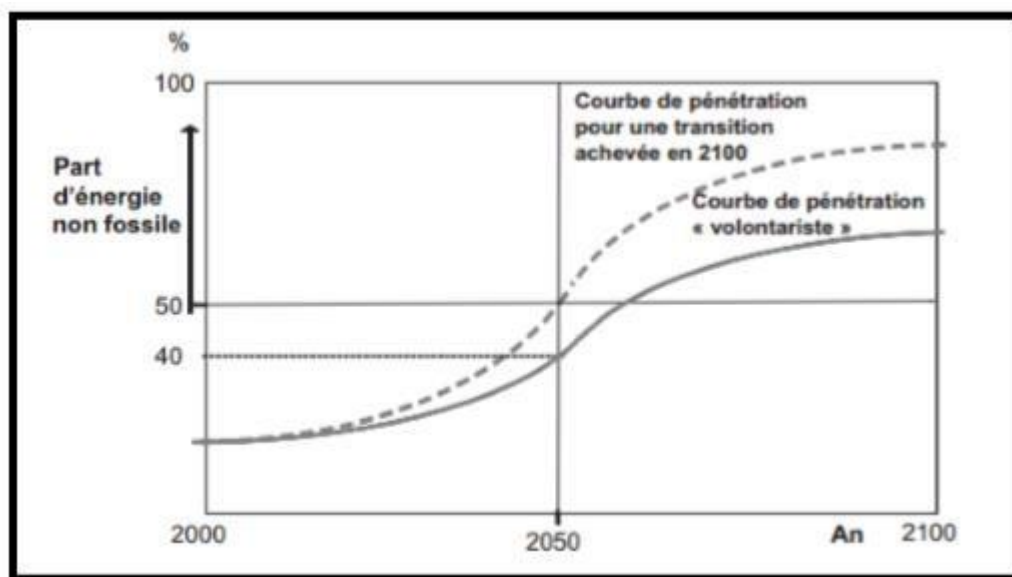
En raison du haut niveau de la demande énergétique et de l'ampleur des menaces qui pèsent sur l'environnement, l'achèvement de cette transition énergétique, apparaît lointain. En effet, pour un ensemble de raisons économiques et techniques, les énergies alternatives (renouvelables, nucléaire) ne peuvent pas être substituées rapidement et massivement aux énergies fossiles. Les solutions alternatives (nucléaire et renouvelables) posent en effet des problèmes en termes de maturité technologique et de rendement économique en cas de développement massif des énergies

renouvelables ou encore de sécurité ainsi que d'acceptabilité sociale en ce qui concerne l'énergie nucléaire (Rojey, 2008).

Pour remédier aux différentes menaces que présente le réchauffement climatique, il faut agir dans une perspective de développement durable, c'est-à-dire répondre aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs<sup>9</sup>. Cependant, la notion même de transition peut paraître en contradiction avec le concept de développement durable. En effet, un nouveau système énergétique basé sur la transition sera sans doute plus durable que le système actuel, mais ni totalement, ni définitivement. Il est donc plus logique de parler d'un développement « soutenable » plutôt que « durable » (Burbage, 2013), puisque aucun système ne peut se perpétuer indéfiniment.

Une longue période de transition sera nécessaire pour inverser les parts respectives des énergies fossiles et non fossiles, en partant du système actuel basé à 80 % sur les énergies fossiles. La figure 7 ci-dessous présente les prévisions d'évolution de la part des énergies d'origine non fossile sur la période 2000-2100.

**Figure 7:** Évolution de la part d'énergie d'origine non-fossile



Source : Alexandre Rojey, « *Énergie & climat: réussir la transition énergétique* ».

<sup>9</sup>Définition du développement durable du rapport Bruntland présenté aux Nations Unis en 1987.

A l'horizon 2100, l'évolution générale de la part des énergies fossiles dans la production totale d'énergie prend la forme d'une courbe en S. De l'an 2000 à l'an 2050, cette évolution est plus ou moins lente favorisant la dominance des énergies fossiles. Le point d'inflexion de la courbe d'une transition énergétique achevée se situe en 2050. A partir de cette année, la part des énergies non fossiles va dépasser 50%. L'autre scénario correspond à une transition énergétique inachevée en 2100, ce cas est également favorable à la pénétration des énergies d'origine non fossile mais à un rythme plus lent que celui de la deuxième courbe. En effet, le point d'inflexion se situera toujours en 2050, mais la part des énergies renouvelables ne dépassera pas 30 à 40%.

La durée de cette transition s'avère normale si on prend en compte le temps nécessaire à la mise au point des solutions alternatives (surtout dans le domaine des transports dépendant presque exclusivement du pétrole) et par l'inertie intrinsèque du secteur de l'énergie. En plus la durée d'amortissement de certaines installations de production d'énergie telles que les centrales électriques s'étale jusqu'à trente ou quarante ans.

Après avoir fait le point sur l'accroissement des besoins énergétiques, sur l'avenir des combustibles fossiles et sur l'indispensable transition énergétique, nous nous proposons d'examiner chacune des sources d'EnR. Nous présenterons chaque type d'EnR ainsi que les outils de soutien public nécessaires à leur déploiement.

## **Section 2 : Les énergies renouvelables : états des lieux, législation, coût et perspectives de développement**

Comme nous l'avons vu dans la section 1 il est nécessaire d'aménager une transition, de manière à éviter, d'une part, une crise majeure dans les approvisionnements énergétiques et, d'autre part, un changement climatique aux conséquences catastrophiques. La solution consiste au remplacement progressif des énergies fossiles par les EnR qui ne présentant pas les mêmes inconvénients.

Le recours aux énergies renouvelables répond à un double objectif :

- Lutter contre le changement climatique dû aux émissions de CO<sub>2</sub>;
- Réduire la dépendance énergétique au pétrole, en particulier dans les secteurs qui en sont les plus dépendants, comme les transports et la pétrochimie.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)

Nous allons dans un premier lieu définir chaque type d'énergie, présenter les différentes technologies associées, ainsi que les principaux avantages et inconvénients. Nous nous consacrerons dans un second lieu à l'analyse des coûts associés à l'utilisation des EnR ainsi qu'aux instruments de soutien.

## **2.1 Présentation des différentes énergies renouvelables**

On appelle énergies renouvelables, les énergies issues de sources non fossiles renouvelables. Elles servent à produire de la chaleur, de l'électricité ou des carburants. Les techniques de cogénération permettent de produire à la fois chaleur et électricité (Collard, 2015)

L'Union européenne définit « l'énergie produite à partir de sources renouvelables » (directive 2009/28/CE, article 2) comme « une énergie produite à partir de sources non fossiles renouvelables, à savoir : énergie éolienne, solaire, aérothermique, géothermique, hydrothermique, marine et hydroélectrique, biomasse, gaz de décharge, gaz des stations d'épuration d'eaux usées et biogaz ». <sup>11</sup>

Les principales énergies renouvelables sont :

- L'énergie hydroélectrique ;
- L'énergie éolienne ;
- L'énergie de biomasse (biomasse solide, déchets urbains, biogaz et biocarburants);
- L'énergie solaire (photovoltaïque, thermique , thermodynamique);
- La géothermie ;
- Les énergies marines.

Provenant directement des phénomènes naturels, réguliers ou constants, notamment l'énergie du soleil, du vent, de la terre ou de la gravitation, les EnR sont donc théoriquement inépuisables à très long terme. Elles sont donc un facteur de lutte contre le changement climatique et un atout pour la transition énergétique. Toutefois, leurs potentiels de production restent très variables car il dépend de la localisation géographique et des conditions climatiques.

---

<sup>11</sup>Commissariat général au Développement durable

**Figure 8:** Classement des 5 premiers pays par type et quantité d'EnR en 2015



Source : AIE, World Energy Balances (2015 edition)

En termes de comparaisons internationales, la Chine reste selon l'AIE, le premier producteur d'énergies renouvelables dans le monde suivie de l'Inde puis de l'Union Européenne. La figure 7 montre que la Chine se positionne en tête de classement concernant à la fois l'éolien, le solaire photovoltaïque et l'hydraulique. On note également la présence des États-Unis dans le classement des 5 premiers producteurs de toutes les filières d'EnR.

Selon les statistiques de l'Eurostat (2015), au niveau européen, la France est le troisième producteur d'énergies renouvelables dans l'UE (21 417 Ktep), derrière l'Allemagne (38 886 Ktep) et l'Italie (23 564 Ktep). L'analyse de la production primaire d'énergie en Europe montre la dominance des énergies fossiles et nucléaire. La part de ces énergies est de 74,2%, contre 24,3% seulement pour les énergies renouvelables. La biomasse et l'énergie hydraulique sont les deux énergies d'origines renouvelables les plus présentes dans le bouquet énergétique.

En termes de filière, les écarts entre les pays européens ont été très significatifs en 2015. L'hydraulique français est la plus importante au niveau européen, avec une production dépassant 5246 Ktep. Concernant l'éolien, la France (1715 Ktep) reste en retrait, notamment par rapport à l'Allemagne (6145 Ktep) et par rapport à l'Espagne (4389 Ktep).



La France arrive au deuxième rang européen derrière l'Allemagne pour la production primaire de biomasse solide (10500 Ktep contre 11000 Ktep), de déchets urbains renouvelables, destinés à être incinérés (1200 Ktep contre 2900 Ktep) et des biocarburants ((2400 Ktep contre 3200 Ktep). Pour la filière biogaz, la France affiche un retard important, elle figure au cinquième rang derrière l'Allemagne, Le Royaume-Uni, l'Italie, la république tchèque. En effet, la production primaire de l'Allemagne est près de quinze fois supérieure que celle de la France (6900 Ktep contre 480 ktep).

Pour le solaire thermique, la France ne figure pas parmi les cinq premiers pays producteurs de l'UE, l'Espagne est le pays le mieux classé avec une production d'environ 1191 Ktep en 2015. En ce qui concerne la géothermie, l'Italie est le pays leader au niveau européen avec une production de 5000 Ktep, la France se trouve au deuxième rang (300 Ktep) destinée pour sa totalité à des fins de chauffage.

Dans ce qui suit, on va procéder à une analyse détaillée de chaque type d'énergie en matière de technologies utilisées, avantages et inconvénients.

#### ● L'énergie hydraulique

L'hydroélectricité récupère la force motrice des cours d'eau, des chutes, voire des marées, pour la transformer en électricité. On distingue les installations hydroélectriques « au fil de l'eau », qui font passer dans une turbine tout ou partie du débit d'un cours d'eau en continu, et celles nécessitant des réserves d'eau (« par écluses » ou « lac ») : les deux types d'installations nécessitent des barrages, qui sont bien plus importants pour la deuxième catégorie (« grands barrages »).<sup>12</sup>

L'hydraulique est la première force motrice dans l'histoire. En effet, l'utilisation de l'hydraulique comme source d'énergie remonte à l'apparition des norias en Asie Mineure, apparition dont on a des traces datées de 200 ans avant notre ère (Acket et Vaillant, 2011). Contrairement aux énergies issues des combustibles fossiles et de la biomasse, l'énergie hydraulique est d'une nature toute différente. En effet, les énergies issues des combustibles fossiles nécessitent des réactions chimiques qui en produisant de l'énergie calorifique détruisent ou changent la matière initiale. Dans le cas de l'hydraulique, l'eau se retrouvera telle quelle en fin de cycle, sans perte de masse hormis quelques fuites éventuelles ; fuites qui retourneront dans le cycle global de l'eau (Nifencker, 2014).

---

<sup>12</sup>Commissariat général au Développement durable

En termes de rejet de gaz carbonique, l'hydraulique reste incontestablement la source la moins émettrice de gaz à effet de serre et de déchets toxiques parmi toutes les sources de production d'électricité. La production du gaz carbonique vient du béton monopolisé en énormes quantités dans les centrales hydrauliques, au même titre que le nucléaire et l'éolien. La fabrication du béton est responsable de l'émission de 60 kg de gaz carbonique par mètre cube de béton. Toutefois, en comparaison avec les centrales au gaz (650 g de CO<sub>2</sub>/kWh pour les centrales classiques, ramenés à 430 pour les nouvelles centrales à cycle combiné), les centrales hydrauliques restent les moins émettrices (Acket et Vaillant, 2011). En plus de son caractère non polluant, l'énergie hydraulique se caractérise également par des risques d'accidents (rupture de barrage) très faibles, grâce à un contrôle continu des ouvrages.

En revanche, comme chaque type d'énergie, l'énergie hydraulique présente quelques inconvénients, en particulier la lourdeur des investissements nécessaires pour l'installation des centrales hydrauliques, les impacts environnementaux à la construction d'environnement et de perturbation de l'équilibre écologique, en amont et en aval du barrage, le risque de sécheresse et la nécessité d'avoir un terrain propice.

#### • La biomasse

L'Union Européenne précise que « *la biomasse correspond à la « fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux* ».

L'ADEME regroupe la biomasse en trois sous-ensembles: la biomasse solide (déchets ménagers, bois, déchets de bois, déchets agricoles et déjections animales), la biomasse liquide (les biocarburants) et le biogaz.

Si on ne tient pas compte des activités de déforestation et les pertes dans le cycle de l'exploitation, la biomasse peut être considérée comme neutre vis-à-vis des rejets du gaz carbonique (Le Bars et al., 2012). En effet, elle fixe provisoirement le carbone (la synthèse d'une tonne de cellulose fixe 0,4 tonne de carbone, soit 1,47 tonne de gaz carbonique). Le gaz carbonique ainsi stocké sera rejeté lors de la combustion.<sup>13</sup>

---

13 Claude Acket, Jacques Vaillant, «Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives.»

Au niveau mondial, la biomasse est une énergie d'origine renouvelable amplement utilisée; elle constitue à ce jour l'essentiel de la production des énergies renouvelables hors hydraulique. Les formes d'énergies produites à partir de la biomasse varient selon le type de biomasse et les technologies mises en œuvre. On peut en produire de l'électricité, la chaleur et de la force motrice de déplacement. Toutefois, dans certaines centrales de cogénération, on peut produire à la fois l'électricité et la chaleur.

Quelque que soit sa forme, la biomasse est un élément essentiel du développement de l'énergie renouvelable. Elle pourrait jouer un rôle considérable dans la réalisation des objectifs fixés par l'Union européenne, comme l'ont démontré Skytte et al. (2006). Hartmann et Kaltschmitt (1999) ont également montré avec une analyse du cycle de vie de la production d'électricité à partir de divers supports d'énergie renouvelables et fossiles que tous les effets environnementaux étudiés sont nettement inférieurs si la biomasse est utilisée à la place du charbon.

En outre, à l'exception de la biomasse, la plupart des sources d'énergie renouvelables dépendent fortement des conditions météorologiques, ce qui les empêche de constituer une alternative fiable à long terme (Rentizelas et al., 2008). Contrairement à l'énergie photovoltaïque et éolienne, la technologie basée sur la biomasse n'est pas confrontée au problème de l'intermittence de la production. Ainsi la biomasse pourrait jouer un rôle de premier plan dans l'atténuation des besoins énergétiques pendant les périodes où les autres sources énergétiques sont variables et à faible rendement (soleil, vent...) (Jäger-Waldau et Ossenbrink, 2004). La ressource peut être stockée et utilisée pendant les heures de pointe.

De plus, la biomasse est une énergie dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu ; c'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles et dont la valorisation est créatrice d'emplois locaux (Collard, 2015). Toutefois, la biomasse est une énergie à rendement énergétique assez faible qui nécessite l'exploitation des terres arables et donc provoque la baisse de la production agricole. Finalement, une surexploitation de la biomasse (bois-énergie) peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.

#### • L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Une éolienne ou un aérogénérateur est un dispositif qui permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transformée ensuite en électricité. Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle,

l'arbre principal entraîne un alternateur. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1 500 tours/ minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10-15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner (Filloux, 2014).

A côté de l'éolien terrestre, on trouve l'éolien sur mer (éolien offshore). Ce dernier a réellement démarré à la fin des années 2000 après que l'éolien terrestre ait atteint un niveau suffisant de maturité, notamment en Allemagne et au Danemark. L'éolien offshore a le mérite de profiter des ressources de vent en mer plus importantes et plus constantes que celles sur terre, ce qui permet une meilleure prévision de la production et finalement, une production d'électricité plus grande. En effet, un parc éolien offshore peut produire 50% d'énergie de plus qu'un parc éolien terrestre.<sup>14</sup>

L'essentiel du coût de l'éolien repose ainsi sur l'investissement puisque le « combustible » est gratuit. Réellement, en 3 mois, une éolienne produit l'équivalent de l'énergie qu'il a fallu pour la fabriquer, l'installer, l'entretenir et la démanteler, les coûts relatifs sont donc rapidement amortis. Le coût de l'énergie éolienne est donc parfaitement prévisible et est quasiment fixe pour les 25 ans de son existence. (Lechêne, 2015)

Un atout majeur qui profite à toute la filière de l'éolien est spécifique à l'éolien offshore. Ce dernier permet de s'affranchir de la résistance des populations locales à l'installation des parcs éoliens près de leurs domiciles. Cependant, dans le cas de l'éolien offshore, on est toujours confronté aux challenges de la maintenance et à l'entretien des turbines en milieu marin ainsi qu'à des coûts de raccordement au réseau plus élevés.<sup>15</sup>

Même s'annonçant comme énergie prometteuse et à fort potentiel de développement, l'énergie éolienne présente quelques autres limites. En effet, même si les nouvelles générations sont peu bruyantes, certaines éoliennes émettent des nuisances sonores et peuvent contribuer à la modification des paysages et des équilibres du milieu naturel (les oiseaux, flores, faunes ) où elles sont implantées (Samedy, 2015). De plus, les travaux d'installation d'un parc éolien nécessitent des démarches spécifiques pour le transport et le montage. L'énergie éolienne, est seulement envisageable comme une énergie de complément, elle ne peut pas répondre à tous les besoins

<sup>14</sup> La Compagnie du Vent, Groupe GDF SUEZ, «Projet de parc éolien en mer des Deux Côtes».

<sup>15</sup> Panorama 2013, « Le point sur l'éolien offshore ».

électriques d'un pays puisque l'énergie produite est non stockable et nécessite un raccordement immédiat au réseau électrique (Ruiz Gomez, 2012).

- L'énergie solaire

L'énergie solaire transforme le rayonnement solaire en électricité ou en chaleur, selon trois principales technologies: le photovoltaïque, la thermodynamique et la thermique.

-*L'énergie solaire photovoltaïque* convertit le rayonnement solaire en électricité via des modules photovoltaïques. Cette électricité peut être ensuite injectée sur les réseaux électriques ou bien consommée localement.

-*L'énergie solaire thermique* produit de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage domestique et la production d'eau chaude sanitaire à partir de capteurs solaires. Elle se distingue du solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité à partir du rayonnement solaire (Filloux, 2014).

- *L'énergie solaire thermodynamique* produit de la chaleur par absorption du rayonnement solaire. La chaleur produite peut ensuite être convertie en électricité qui sera injectée sur les réseaux électriques. Cette énergie nécessite un ensoleillement direct important. Cette technologie offre également l'avantage de pouvoir stocker une partie de l'électricité produite.<sup>16</sup>

Quelle que soit sa forme l'énergie solaire présente plusieurs avantages. Elle est propre, inépuisable, renouvelable, non polluante et extrêmement modulable puisque les panneaux peuvent être installés sur une construction (maison ou bâtiment) ou au sol.

L'énergie solaire thermique présente la particularité de permettre d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. En plus, l'installation des panneaux solaires thermiques permettent de réaliser des économies conséquentes et finalement les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles (Gabriele, 2009). Quant à l'énergie solaire photovoltaïque, elle est recommandée pour plusieurs raisons. Premièrement, les panneaux ont une durée de vie qui peut aller jusqu'à 20 ans et une surproduction du courant d'électricité qui peut être vendu. Deuxièmement, c'est une source d'énergie électrique totalement silencieuse au contraire de l'énergie éolienne.

Par contre, cette énergie est vivement critiquée sur plusieurs aspects. En effet, certains panneaux

---

<sup>16</sup>Commissariat général au Développement durable

sont très sensibles et peuvent être endommagés lors de phénomènes météorologiques extrêmes (grêle, gel...). L'énergie solaire est une énergie intermittente dans la mesure où la production s'avère impossible pendant la nuit ou par temps couvert. Il faut donc un système de chauffage d'appoint et des ballons ou dalles chauffantes pour pouvoir stocker la chaleur. Et finalement, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.<sup>17</sup>

#### • La géothermie

Chaque jour, notre planète absorbe de l'énergie solaire qu'elle stocke sous forme de calories dans le sol. À la chaleur primitive issue de l'accrétion des matières de la nébuleuse d'origine et à l'énergie gravitationnelle, s'est ajoutée celle de la radioactivité, qui est devenue prépondérante. Cette énergie géothermique est aussi alimentée par le sous-sol profond. Son exploitation permet de produire de l'électricité ou de la chaleur. La géothermie est une source importante de chaleur renouvelable.

La géothermie a de nombreuses applications, la principale concerne le chauffage des bâtiments, soit de façon centralisée par le biais de réseaux de chaleur, soit de façon plus individuelle par l'emploi de pompes à chaleur couplées enterrées (sonde ou aquifère).

On distingue trois types de géothermie<sup>18</sup> :

- La géothermie profonde à haute énergie (150 – 250°C, 2 500 m) pour la production d'électricité (vapeur + turbine) ;
- La géothermie moyenne à basse énergie (30 à 150°C dans les aquifères) pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur ;
- La géothermie à très basse énergie (<30°C, 10 à 100 m) par pompe à chaleur (PAC).

En comparaison avec le solaire et l'éolien, la géothermie présente le gros avantage de fournir de l'énergie en continu. Elle n'a pas besoin d'un espace de stockage comme les cuves à fioul ni, de conduit d'évacuation, ni de transports (puisque'elle est disponible à domicile). Cependant, elle nécessite une expertise et une connaissance du sous-sol qui sont un frein à son développement. De plus, la durée d'amortissement des infrastructures nécessaires doit être suffisamment longue avec un risque d'abaissement de la température de la source géothermale au bout d'une longue période de

---

<sup>17</sup> Douibi Camille, «L'énergie solaire travail de technologie en 3ème sur l'énergie solaire», 2014

<sup>18</sup> [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)

fonctionnement, la chaleur puisée n'étant renouvelée que très lentement.<sup>19</sup>

En plus, utilisée sous la forme d'eau directement ou de chaleur, l'énergie géothermique dégage de faibles vapeurs de soufres et empêcher les plantations de pousser si la terre est trop pauvre en calories. Enfin, les pompes à chaleur utilisent à l'intérieur un fluide réfrigérant ou frigorifique appelé couramment "fréon". Certains fluides dits "HCFC" sont nocifs pour la couche d'ozone et leur émission dans l'atmosphère a un effet destructif.<sup>20</sup>

Après avoir présenté les différentes technologies d'EnR, nous nous consacrons dans la suite de cette deuxième section à une analyse économique des coûts relatifs à chaque type d'EnR en France ainsi qu'à une présentation des instruments de soutien mis en place pour promouvoir les différentes filières d'EnR.

## **2.2 Le marché des énergies renouvelables : évolution des coûts**

En termes de coût, les centrales hydroélectriques sont très coûteuses en investissements mais très peu en fonctionnement. En effet, selon les chiffres fournis par la Commission de régulation de l'énergie et de la Cours des comptes, l'énergie hydraulique est l'énergie dont le coût de production est le plus compétitif suivie par le nucléaire. Les barrages nécessitent des coûts de construction colossaux, mais présentent très peu de frais de fonctionnement et de maintenance.

Quelques chiffres permettent de donner les ordres de grandeur, pour une centrale hydraulique, si le combustible est gratuit, l'investissement peut en revanche représenter plus de 85 % du coût du kWh. La variable principale sera la durée prise en compte pour amortir l'investissement. Une fois les emprunts initiaux remboursés, il ne reste à assurer que les dépenses d'exploitation et d'entretien-maintenance (coûts estimés entre 1 et 3 €/kWh) ainsi que des provisions pour les grosses réparations (Rojey, 2008). Il faut cependant noter qu'il est difficile de donner une référence absolue du coût d'investissement de l'hydraulique, car à chaque site correspondent des aménagements spécifiques. Chaque centrale hydroélectrique est un cas particulier.

Concernant la filière éolienne, l'essentiel des coûts de production est lié à ses coûts fixes d'investissement, élevés à durée d'amortissement de 15 à 20 ans. Réellement, en 3 mois, une

---

<sup>19</sup>Alexandre Rojey, « *Énergie & climat: réussir la transition énergétique.* », 2008.

<sup>20</sup> [www.Energierenouvelable.fr](http://www.Energierenouvelable.fr)

éolienne produit l'équivalent de l'énergie qu'il a fallu pour la fabriquer, l'installer, l'entretenir et la démanteler, les coûts sont donc rapidement amortis. De plus, étant une énergie non consommatrice de carburants et à faibles coûts d'infrastructure, d'exploitation et de maintenance, le coût marginal lié à son fonctionnement reste très faible. <sup>21</sup>Selon l'Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie (ADEME), le coût de production de l'électricité éolienne terrestre est estimé en 2016 entre 54 € et 108 € le MWh pour des machines standards et entre 50 € et 94 € le MWh pour des éoliennes de nouvelles générations. Pour la filière éolienne offshore, le coût de production est estimé à plus de 220 euros par MWh.

Dans le cas de l'énergie solaire, le prix d'une installation photovoltaïque dépend principalement de la taille du système et de son mode d'intégration aux bâtiments. Le tableau ci-après donne une première estimation des coûts de ces installations:

**Tableau 5:** Coût d'une installation photovoltaïque<sup>22</sup>

Puissance en KiloWatt crête (kWc)	Intégration simplifiée au bâti (ISB)	Intégration au bâti
<3kWc	2,9 à 3,6 €HT/Wc	3 à 3,8 €HT/Wc
3 à 36 kWc	2,7 à 3,3 €HT/Wc	2,6 à 3,4 €HT/Wc
36 à 100 kWc	2,3 à 3 €HT/Wc	2,4 à 3 €HT/Wc

Le producteur doit supporter les frais de branchement au réseau de son installation photovoltaïque, ainsi que les éventuels travaux d'extension du réseau nécessaires pour permettre l'évacuation de sa production. En plus de ces coûts de raccordement, une quote-part pourra être facturée, en application du Schéma Régional de Raccordement au Réseau des Energies Renouvelables. Le reste des coûts inclue l'étude d'ingénierie, les équipements et leur mise en œuvre, le système éventuel de suivi et le coût du contrat de services correspondant.

En termes de coûts, les investissements sont élevés pour la filière géothermique, les investissements sont élevés du fait des forages et du faible rendement de la transformation de la chaleur en énergie mécanique. Le calcul des coûts doit toutefois tenir compte de la continuité de la production d'électricité par géothermie. En effet, la géothermie permet une alimentation énergétique

<sup>21</sup>Syndicat des énergies renouvelables, « Etat des coûts de production de l'éolien terrestre en France », 2014

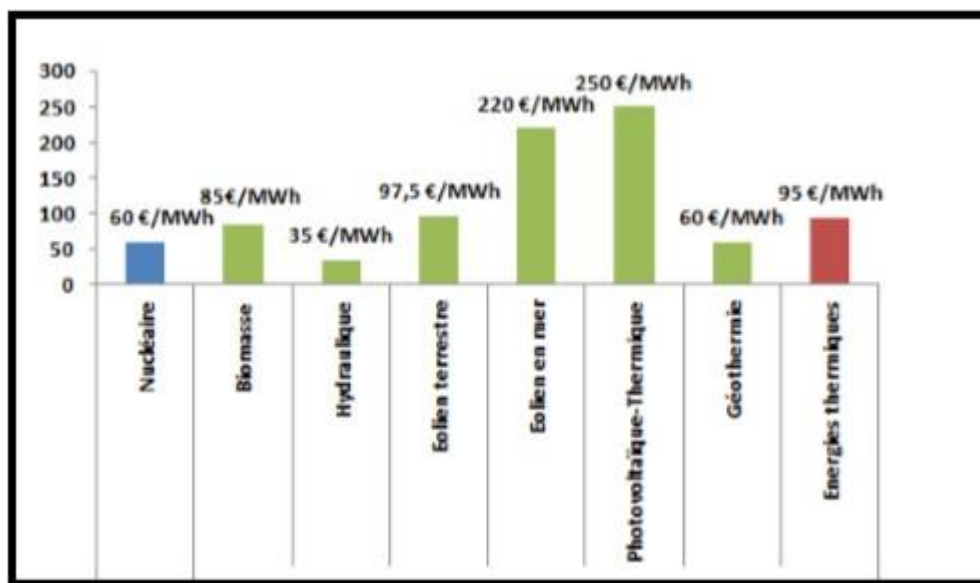
<sup>22</sup>Alain Filloux, « Intégrer les énergies renouvelables ».



100 % renouvelable, non intermittente et au rendement permanent. Cela constitue un avantage par rapport aux autres sources d'électricité renouvelables comme le vent ou le soleil, soumises, elles, aux variations et aléas des conditions atmosphériques.

La figure ci-après fournit une comparaison des coûts de production d'électricité des différentes filières renouvelables.

**Figure 9:** Différences des coûts complets de production des différentes sources de production d'électricité en France.



Source : construit à partir des données du Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaires et Alternatives (GAENA)

Malgré leurs coûts de construction colossaux, les barrages, une fois en place, présentent très peu de frais de fonctionnement et de maintenance. A l'heure actuelle, l'éolien terrestre et la géothermie sont les EnR (hors hydraulique) les plus compétitives. Des travaux d'innovation et de développement industriels sont en cours pour rendre les autres EnR économiquement abordables. On peut notamment citer les avancées sur l'obtention de silicium quasi-monocristallin qui permettent la fabrication de cellules photovoltaïques à haut rendement et à moindre coût. D'autres innovations liées au numérique, qui devraient permettre de réduire les coûts d'intégration des renouvelables au réseau électrique, grâce à l'amélioration des prévisions de production, à la réduction des coûts de raccordement ; ou encore au déploiement de nouvelles technologies permettant d'éviter des travaux de renforcements de réseau quand les besoins ou la production renouvelable augmentent (Marchal, 2017).

Les coûts sont évalués en prenant en compte plusieurs critères, notamment la durée du cycle de vie, les coûts externes relatifs aux dommages environnementaux causés par la pollution liée à la source d'énergie. Si l'énergie est intermittente: leurs coûts réels doivent intégrer d'autres paramètres tels que le coût des énergies de remplacement (3 à 25 €/MWh), le coût du raccordement et renforcement réseau (2 et 13 €/MWh) et le prix du carbone émis par ces énergies de substitution (5 €/tonne de CO<sub>2</sub>) (Bruhl, 2016).

## **2.3 La promotion des énergies renouvelables : instruments de soutien**

Avant de présenter les différents instruments mis en place pour promouvoir le développement des EnR en France, nous commençons par présenter brièvement les instruments théoriques de soutien aux EnR.

### *2.3.1 Instruments théoriques de soutien aux EnR*

Toutes les énergies ont été aidées par les pouvoirs publics, que ce soit par le biais de subventions, d'aides à la recherche ou d'incitations fiscales. Quatre mécanismes principaux sont envisagés: le mécanisme des prix d'achat garantis (FIT), celui des contrats pour différences (CFD), le système des prix de marché associés au versement d'une prime (FIP) et le mécanisme des appels d'offre avec enchères.

#### • Le système des « feed-in tariffs » (FIT)

Le mécanisme FIT est mis en place au début des années 2000 dans la plupart des pays de l'U.E pour promouvoir la pénétration des EnR. L'électricité renouvelable bénéficie d'un prix rémunérateur garanti, fixé par les pouvoirs publics, et d'une obligation d'achat dans le cadre d'un contrat à long terme avec l'opérateur historique. Il s'agit de prix fixes d'électricité payés aux producteurs d'EnR pour chaque unité d'énergie produite et injectée dans le réseau électrique. Le paiement du FIT est garanti pour une certaine période de temps qui est souvent liée à la durée de vie économique du projet concerné (généralement entre 15-25 ans). Les producteurs sont ainsi à l'abri de certains des risques inhérents à la production d'EnR, ce qui permet une plus grande diversité dans les technologies énergétiques.

- Le mécanisme des « contrats pour différences » (CFD)

Le principe des contrats pour différences (CFD) consiste à garantir au producteur d'électricité un revenu qui rentabilise son investissement. Le producteur vend son électricité au prix du marché mais il perçoit un complément de recette qui correspond à la différence entre un prix théorique de référence, garanti pendant une certaine durée (15 à 20 ans selon la période d'amortissement), et le prix du marché spot. Le producteur reçoit cette différence si le prix garanti est supérieur au prix du marché mais il la verse dans le cas contraire. Ce système est applicable pour les EnR comme pour les autres formes d'énergie. Dans le cas des EnR, ce différentiel rémunère l'externalité positive que constitue une énergie « décarbonée » (Hansen et Percebois, 2015)

Ce système CFD semble particulièrement bien adapté pour des équipements pour lesquels les coûts fixes représentent une part élevée des coûts totaux, ce qui est le cas de l'hydraulique, de l'éolien ou du photovoltaïque. Ces équipements ont besoin d'un revenu garanti stable qui assure la rentabilité de l'investissement; leurs coûts variables demeurent modestes et ne sont pas ou peu liés à la volatilité du prix du combustible. En même temps il est logique que l'investisseur ne soit pas totalement déconnecté du prix du marché spot au niveau de son comportement d'offreur (Percebois, 2014).

- Le mécanisme des « feed-in tariffs avec premium » (FIP)

Dans le cadre d'un régime FIP, l'électricité produite à partir des sources renouvelables est généralement vendue sur le marché spot et les producteurs des EnR reçoivent une prime en plus du prix du marché de leur production d'électricité. Le FIP peut être fixe (c'est-à-dire à un niveau constant indépendant des prix du marché) ou variable (c'est-à-dire avec des niveaux variables selon l'évolution des prix du marché). L'intérêt de ce système réside dans le fait que le producteur est totalement intégré au marché spot de l'électricité et obtient un complément de revenu destiné à couvrir des surcoûts ou à rémunérer une qualité particulière de l'électricité injectée (externalité environnementale positive). Avec le FIP, le complément de revenu est fixe (du moins si la prime est fixe) alors qu'il était variable avec le CFD.

- Le mécanisme des appels d'offres avec enchères

Avec ce système les pouvoirs publics prennent l'initiative d'indiquer quelle puissance d'électricité renouvelable doit être construite en un lieu donné, ce qui donne indirectement une estimation du montant d'électricité renouvelable qui sera injectée sur le réseau dès lors que l'on se fixe un facteur de charge de référence. Ils procèdent par appels d'offre, en général sous plis scellés. Les producteurs intéressés doivent fournir deux indications: la puissance qu'ils peuvent installer, d'une part, le prix du MWh qu'ils souhaitent obtenir pour rentabiliser l'installation, d'autre part. Les pouvoirs publics procèdent ensuite, un jour donné, à l'ouverture des plis et classent les offres par ordre de prix demandé croissant (logique du « merit order ») ; ils retiennent les meilleures offres jusqu'à concurrence du volume de MW ou de MWh souhaité. Deux systèmes sont alors possibles: des enchères à « prix-limite » et des enchères « au prix demandé ».

Nous nous intéresserons dans ce qui suit à l'applicabilité de ces instruments dans le cas français.

### 2.3.2 *Mise en place des dispositifs de promotion des EnR*

Le développement des énergies renouvelables bénéficie d'un soutien de l'État soit en amont dans le domaine de la recherche et développement, soit en phase d'industrialisation en soutien à la demande et au déploiement commercial (par exemple par le biais de tarifs d'achat, d'appels d'offres ou de dispositifs fiscaux).<sup>23</sup>Le choix entre les différents outils de soutien dépend de la maturité technologique, de la compétitivité et des retombées en termes de valeur ajoutée. Par conséquent, étant suffisamment mature, les dispositifs de soutien de la filière hydraulique restent limités par rapport aux nouvelles filières d'EnR. Selon le ministère de la transition écologique et solidaire, le soutien aux installations hydrauliques peut se faire sous deux formes :

- Selon le principe du guichet ouvert, pour toute installation de moins de 1 MW, qui peut se voir attribuer un contrat d'obligation d'achat ou de complément de rémunération en fonction de sa puissance et suivant qu'il s'agisse d'une installation nouvelle ou rénovée,
- Via des appels d'offres organisés par la Commission de régulation de l'énergie, pour les autres installations suivant des conditions particulières alors définies dans les cahiers des charges.

---

<sup>23</sup>Panorama énergies-climat – Edition 2013, « *Les dispositifs de soutien à la production d'énergie renouvelable* »

Quant à la production de chaleur et de l'électricité à partir de la biomasse, des mesures de soutien ont été également mises en œuvre. En effet, dans le secteur résidentiel individuel, les appareils de chauffage au bois sont éligibles au crédit d'impôt développement durable, à l'éco-prêt à taux zéro ainsi qu'au dispositif des certificats d'économies d'énergie. Il existe également d'autres dispositifs de développement des installations biomasse dans les bâtiments du logement collectif et des secteurs tertiaire, agricole et industriel, notamment de dispositif de soutien ADEME des installations de petite taille dans le cadre de la contractualisation avec les régions (CPER) et les aides du fonds chaleur lancé en 2009 pour les installations de taille supérieure à 100 tep/an.

La politique de soutien à la filière biomasse électrique se présente sous trois aspects. Elle concerne uniquement l'électricité produite par cogénération et dépend de la capacité de production des installations. En effet, le développement des installations de cogénération de plus de 12 MW est soutenu par des appels d'offres de la commission de régulation de l'énergie (CRE) tandis que le développement des unités comprises entre 5 et 12MW est soutenu par un tarif d'achat réglementé (43,4 euros par mégawatheure) instauré par l'arrêté du 27 janvier 2011. Toutefois, réservé seulement aux installations de plus de 5 MW, le nombre de projets développés sur la base de ce tarif reste extrêmement faible.

Concernant la filière solaire, pour favoriser le développement de la filière, l'arrêté tarifaire du 4 mars 2011 a prévu un tarif d'achat applicable pour les installations thermodynamiques de moins de 12MW. Contrairement aux installations solaires photovoltaïques, les installations solaires thermodynamiques bénéficient du tarif d'obligation d'achat sans limitation de durée de fonctionnement annuel. Deux dispositifs ont été mis en place au niveau national pour soutenir le développement de la filière du solaire thermique. D'une part, le crédit d'impôt développement durable mis en place en 2005 permettant de soutenir le développement des équipements individuels. D'autre part, le fonds chaleur créé en 2009 et doté de près de 1,2 milliard d'euros pour la période 2009-2013, a permis de financer des projets dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire et de l'industrie. Il permet notamment de développer le marché de l'eau chaude collective.

S'agissant de la filière éolienne, un dispositif public de soutien juridique et économique a été mis au service de la filière de l'éolien. Sur le plan juridique, la loi d'avril 2013 a supprimé la règle des cinq mâts par installation (loi Grenelle 2) et les ZDE (zone de développement de l'éolien terrestre). Sur le plan économique, la Cour des Comptes et le gouvernement ont confirmé la pertinence du

tarif d'achat pour soutenir la filière. Le dispositif de soutien économique de la part des pouvoirs publics de l'éolien a prévu en 2001 l'achat par EDF de l'électricité éolienne produite à un prix fixe et garanti. Ce tarif d'obligation d'achat permet de sécuriser les investissements en donnant une visibilité de long terme aux acteurs de la filière et garantit également, sur une durée de 15 ans, un prix indépendant de toute augmentation du coût des matières premières.

Ce dispositif exige que, chaque kilowattheure d'électricité produit par une éolienne terrestre soit acheté à 8,20 centimes d'euro par EDF pendant 10 ans, puis entre 2,80 et 8,20 centimes d'euro pendant 5 ans selon la productivité du site. Il postule également que les consommateurs payeront la contribution au service public d'électricité (CSPE) destinée au financement du surcoût lié à l'achat de l'électricité.<sup>24</sup> Toutefois, même avec l'arrêt du tarif d'achat, les éoliennes contribueront à terme à faire baisser le coût de l'énergie puisque le vent est une ressource gratuite et le coût potentiel de production de l'éolien est très faible, ce qui permettra dès 2025 de réduire la facture énergétique du consommateur.

Enfin, la production électrique à partir de la géothermie a bénéficié jusqu'en 2016 d'un soutien sous forme de tarif d'achat. A compter de 2016 et conformément aux lignes directrices de la Commission européenne en matière d'aides d'État, la filière bénéficie désormais d'un soutien sous forme de complément de rémunération en guichet ouvert où toute installation éligible peut conclure directement un contrat de complément de rémunération dont le versement est assuré par EDF.

Au final, nous notons que les EnR électriques bénéficient de subventions d'exploitation au travers d'obligations d'achat et de mécanismes de compensation, alors que les EnR thermiques bénéficient de subventions d'investissement par le biais du Fonds chaleur et de dispositifs fiscaux (crédit d'impôt). Cette mobilisation financière a connu une progression forte, mais elle a surtout profité aux EnR électriques.

## **Conclusion**

L'énergie est devenue, en moins d'un siècle, un enjeu économique et stratégique majeur et un symbole du succès du développement économique. En effet, des relations étroites existent entre l'énergie et le développement économique. Cependant, le développement des industries à forte consommation énergétique a entraîné des graves atteintes à l'environnement. Le changement

---

<sup>24</sup> *Commissariat général au Développement durable : « Filières énergétiques et compétitivité ».*

climatique, l'épuisement des combustibles fossiles et les risques géopolitiques rendent inévitable le passage aux EnR.

La politique en faveur du développement des énergies renouvelables a été conçue dans un contexte qui a fortement évolué ces dernières années. En effet, les engagements pris dans le cadre du paquet énergie climat au niveau européen, et du Grenelle Environnement au niveau national, placent la lutte contre le changement climatique et le développement des énergies renouvelables au premier rang des priorités. La France doit plus que doubler sa production d'énergies renouvelables d'ici 2020 afin d'atteindre l'objectif de 23% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale en 2020.

Pour pouvoir satisfaire cet objectif ambitieux, il faut mobiliser une véritable dynamique de territorialisation des EnR permettant d'intégrer toutes les parties prenantes, notamment les collectivités territoriales dans le processus de transition énergétique. En effet, les EnR permettent de valoriser les ressources naturelles locales, hydraulique, ensoleillement, vent, biomasse ..., constituant ainsi un mode de production énergétique décentralisé.

La politique énergétique de déploiement des EnR doit être impulsée par les autorités publiques, au début, mais elle doit progresser rapidement vers d'autres formes de gouvernance. Elle doit donc évoluer progressivement et s'orienter vers une gouvernance locale participative. Dans les chapitres suivants, nous nous intéresserons au développement territorial des énergies renouvelables en France, pays à forte tradition étatique centralisatrice. Nous fournirons dans le premier chapitre une typologie des régions françaises en termes de diversification du bouquet énergétique en 2015 ; nous considérerons des données relatives aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie). Nous adopterons une approche dynamique dans le deuxième chapitre dans le but de mieux appréhender les efforts régionaux en termes de promotion des EnR. Nous étudierons le développement régional des EnR sur la période 1990-2015. Enfin, nous identifierons dans le dernier chapitre les déterminants des différences de consommation entre les régions. Nous construirons un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la part des EnR dans la consommation finale d'énergie au niveau régional sur la période 1990-2015.

# **Chapitre 1 : Performances contrastées du développement des énergies renouvelables dans les régions françaises**

## **Introduction**

Au cours des années 1990, les enjeux environnementaux sont devenus une préoccupation majeure des décideurs politiques ; face aux menaces liées au changement climatique, il apparaît alors essentiel de réduire la consommation énergétique, de limiter l'utilisation des énergies polluantes et de favoriser le développement d'énergies bas-carbone. Le développement des technologies de production basées sur l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables (EnR) doit permettre de réduire considérablement les émissions futures des gaz à effet de serre (Hoffert et al., 2002 ; Rohatgi et al., 2002). L'énergie nucléaire joue un rôle clé dans le développement économique de long terme et dans l'élaboration des stratégies environnementales. Elle a permis de satisfaire les besoins énergétiques de pays dans lesquels la croissance de la demande énergétique est rapide (Fiore, 2006). Grâce à l'énergie nucléaire, la France est l'un des pays les moins émetteurs de gaz à effet de serre au monde. Toutefois, la croissance de l'énergie nucléaire est confrontée à un triple défi, à savoir, la sécurité opérationnelle, l'élimination des déchets radioactifs et le risque de la prolifération des matières nucléaires, ainsi que le défi de l'acceptation publique de l'énergie nucléaire (Toth et Rogner, 2006). Par conséquent, la transition énergétique est censée s'orienter principalement vers les EnR.

La transition énergétique vers des énergies bas-carbone est désormais un paradigme dominant des politiques publiques liées à l'énergie. Torvanger et Meadowcroft (2011), Shrimali et Kniefel (2011) et Aklın et Urpelainen (2013) soulignent l'importance de l'orientation des politiques publiques dans l'accompagnement de la transition énergétique et le déploiement des EnR. Favoriser l'essor des EnR nécessite une transformation technologique radicale du système énergétique mondial ainsi que la mise en place rapide de politiques visant à encourager des efforts concertés et coordonnés pour intégrer les préoccupations mondiales dans les politiques locales et nationales. Les combustibles fossiles continuent de dominer le paysage énergétique en grande partie à cause d'une défaillance du marché, qui amène à négliger le coût de leurs externalités négatives (Unruh, 2000). Les combustibles fossiles bénéficient, en raison des siècles de développement industriel, d'énormes avantages structurels, ce qui les rend plus matures que les EnR alternatives durables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Ces handicaps sont encore aggravés par les subventions accordées aux combustibles fossiles (OCDE, 2015). Par conséquent, l'action gouvernementale est nécessaire pour accompagner les trajectoires de la transition énergétique (Unruh, 2002; Loorbach, 2010). Le développement des EnR requiert la mise en place de mesures incitatives permettant de pallier des coûts très supérieurs à ceux des énergies « classiques », notamment le nucléaire (Acket et Vaillant, 2011). Dans cette perspective, la plupart des



pays de l'Union européenne ont mis en place au début des années 2000 un mécanisme de prix d'achat garantis visant à favoriser l'essor des EnR. L'électricité d'origine renouvelable bénéficie d'un prix rémunérateur garanti, fixé par les pouvoirs publics, et d'une obligation d'achat dans le cadre d'un contrat à long terme avec l'opérateur historique (Hansen et Percebois, 2017). Par ailleurs, le paquet législatif climat- énergie, adopté le 12 décembre 2008 par le Conseil Européen, fixe un objectif de 20% d'EnR dans la consommation finale d'énergie à l'horizon 2020. En adoptant la loi de transition énergétique pour la croissance verte (loi n° 2015-992) le 17 août 2015, la France s'est engagée à porter la part des EnR à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % en 2030.

La réalisation de tels objectifs nécessite une participation active des collectivités territoriales et de l'ensemble de leurs compétences (Jeulin et Delbosch, 2011). Les EnR sont fortement liées à la notion de territoire puisqu'elles constituent un mode de production énergétique décentralisé valorisant les ressources naturelles locales. La déréglementation progressive des marchés de l'électricité et du gaz (réalisée sous l'impulsion de la Communauté Européenne dans les années 2000), effective depuis le 1er juillet 2007, a favorisé une plus grande autonomie des territoires en matière de politique énergétique ; elle a conforté le rôle essentiel des collectivités territoriales dans la distribution de l'énergie et a élargi leurs compétences en matière de production d'énergie (SENAT, 2013). Les deux lois « Grenelle » (loi n° 2009-967 du 3 août 2009 et loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010) ont conféré aux collectivités territoriales un rôle majeur dans la mise en place de la transition énergétique en étendant leur champ de compétences dans le domaine de la politique énergétique, en leur permettant de développer des actions en faveur de la maîtrise de l'énergie et d'intervenir dans le domaine de la production des sources d'EnR. La mise en place du « Plan d'action national en faveur des énergies renouvelable » pour la période 2009-2020 a impulsé une véritable dynamique de territorialisation des EnR. Pour exercer ses missions, la région dispose du Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie (SRCAE), créé par la loi 2010-788 du 12 juillet 2010, dite « loi Grenelle II ». Ce schéma doit définir, à partir d'un état des lieux, des objectifs et des orientations aux horizons 2020 et 2050 (De Charentenay et al., 2012). Des Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des EnR (S3REnR) ont été mis en place pour favoriser la réalisation des objectifs fixés par les SRCAE.

Les stratégies régionales sont définies et mises en œuvre au niveau local par les collectivités territoriales (communes, Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI), agglomérations, etc.) qui sont fortement mobilisées. En effet, outre l'enjeu environnemental, la création de nouvelles filières énergétiques durables et territorialisées est susceptible de générer des emplois locaux non délocalisables. L'énergie peut être vue comme « une contrainte, ou au contraire une opportunité pour le développement d'un territoire dont l'organisation spatiale est plus ou moins

largement influencée par les modalités de son approvisionnement énergétique » (Schoumaker, 2011). En effet, la production et la consommation d'énergie varient fortement d'une région à l'autre et dépendent directement des ressources, du climat, de l'activité économique et de la démographie. Les stratégies régionales de développement des EnR ainsi que le choix des filières (solaire photovoltaïque, solaire thermique, hydroélectricité, éolien, biomasse et géothermie) sont donc très diversifiés.

L'objectif de cet article est de proposer un état des lieux du développement des EnR en France en 2015 afin d'évaluer les performances régionales en matière de diversification du bouquet énergétique. La connaissance de leur répartition spatiale et des disparités écologiques constitue un enjeu majeur pour le développement territorial et pour les politiques publiques (Zuindeau, 2005). Le territoire est-il un lieu de cumuls de handicaps socio-économiques et environnementaux ? Est-ce que le déploiement des EnR ne va pas renforcer les inégalités, en raison de l'inégalité des ressources entre territoires (ensoleillement et mistral dans le sud de la France) et est-ce que ces nouvelles inégalités potentielles ne vont pas s'ajouter aux inégalités existantes ? Quels sont les bénéfices économiques et sociaux des politiques environnementales ?

Plusieurs questions motivent cette recherche : i) comprendre les mécanismes du développement territorial des EnR, ii) comprendre leur répartition spatiale et expliquer les différences régionales, iii) identifier les leviers et les freins au développement des EnR., et iv) évaluer l'efficacité des politiques publiques par rapport aux objectifs fixés.

Nous établissons une typologie des régions françaises caractéristique du développement régional des EnR afin de mettre en évidence des profils territoriaux différents selon les filières énergétiques, cette typologie est réalisée à partir de données relatives aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie) pour l'année 2015. L'originalité de la contribution réside dans la dimension spatiale retenue. Bien que la dimension régionale s'avère la plus pertinente pour évaluer et analyser le développement des EnR, à notre connaissance, aucune analyse statistique comparative n'a été réalisée à cette échelle à ce jour. Les travaux de recherche se sont focalisés sur des comparaisons réalisées à l'échelle des pays<sup>25</sup> ou des Etats américains (Bird et al., 2005) et (Menz et Vachon, 2006).

---

<sup>25</sup> Sadorsky (2009a), (2009b), Marques et Al. (2010), Cadoret et Padovano (2016), Pacasila et Al.(2016), Apergis et Payne (2011), Apergis et Danuletiu (2014).

L'approche adoptée repose sur une complémentarité de méthodes d'analyses de données multidimensionnelles qui tiennent compte des caractéristiques régionales du développement des EnR. Dans un premier temps, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été appliquée sur les facteurs principaux de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) du développement des EnR des 22 régions de France métropolitaine afin de les regrouper en classes de régions homogènes relativement à leur bouquet énergétique et au développement des EnR. Afin de consolider et d'Enrichir la caractérisation de ces classes, nous avons considéré un large éventail de variables dites « thématiques », constituées à la fois de variables environnementales, économiques, démographiques, climatiques et politiques. Nous nous interrogeons plus précisément sur les déterminants de la localisation des EnR au niveau des régions. Enfin, deux types d'analyse ont été appliquées afin d'explorer les liens entre la partition des régions d'EnR réalisée et les variables thématiques considérées. La première est bivariée - l'analyse de la variance (ANOVA) -, elle permet d'évaluer l'effet de la variable explicative qualitative type de développement régional des EnR, synthétisé par la partition, sur chaque variable thématique explicative continue. La seconde est multidimensionnelle - l'analyse discriminante (AD) -, elle permet d'évaluer l'effet d'un ensemble de variables thématiques explicatives et continues sur le développement régional des EnR. Six thèmes ont été considérés : environnement, démographie, développement économique, spécialisation sectorielle, climat et géographie, politique.

## **Section 1 : Présentation des données**

Notre objectif est d'établir une typologie des 22 régions de France métropolitaine<sup>26</sup> relativement à leur bouquet énergétique et au développement des EnR pour l'année 2015. Les spécificités régionales sont appréhendées à partir de variables représentant le poids des EnR dans la consommation finale, les parts des différentes filières<sup>3</sup>(hydraulique, éolien, photovoltaïque, thermique et biomasse) dans la production d'électricité renouvelable, le poids du nucléaire et des combustibles fossiles, les consommations par habitant des biocarburants dans le transport et de la biomasse et de l'énergie solaire thermique dans la chaleur.

Nous avons également retenu l'intensité énergétique en tant qu'indicateur structurel régional. Toutes ces variables dites actives, caractéristiques du développement des EnR sont décrites dans le Tableau 6. Les données ont été collectées auprès de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et du Service de l'Observation et des statistiques (SOeS).

---

<sup>26</sup> Le Service de l'Observation et des statistiques (SOeS) publie uniquement des statistiques énergétiques agrégées pour les cinq départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, La Réunion et Mayotte). La région DOM étant une région fictive, elle est considérée comme un « individu-région supplémentaire », c'est-à-dire qu'elle est projetée *a posteriori* à partir des coordonnées des variables actives qui la caractérisent mais qu'elle ne contribue pas à la détermination des axes factoriels.

**Tableau 6 : Caractéristiques du développement des EnR**

<b>Abréviation</b>	<b>Variable</b>	<b>Définition</b>
<b>Part.ENR.CFTE</b>	La part des EnR dans la consommation finale totale d'énergie (%)	La somme de la consommation des énergies éolienne, solaire, hydraulique et biomasse divisée par la consommation finale totale d'énergie.
<b>Part.ELRN.EPT</b>	La part de l'électricité renouvelable <sup>(1)</sup> (ELR) dans la production totale de l'électricité primaire (PTEM) (%)	La somme de la production d'électricité éolienne, photovoltaïque, thermique et hydraulique et l'électricité produite à partir des bioénergies divisées par la PTEM
<b>PELRN.hab</b>	La production de l'ELR par habitant (Gwh/hab)	La somme de la production d'électricité éolienne, photovoltaïque, thermique et hydraulique et l'électricité produite à partir de la biomasse divisée par le nombre d'habitants de la région
<b>PTEM.hab</b>	La PTEM par habitant (Gwh/hab)	L'électricité produite à partir de sources fossile, nucléaire et renouvelable divisée par le nombre d'habitants de la région
<b>PEN.hab</b>	La production d'électricité nucléaire par habitant (Gwh/hab)	
<b>CCF.hab</b>	La consommation de combustibles fossiles par habitant (Ktep/hab)	La somme de la consommation de charbon, de produits pétroliers et de gaz naturel divisée par le nombre d'habitants dans la région.
<b>Part.hydr.PELRN</b>	La part de la production d'électricité hydraulique dans la production d'ELR (%)	La production d'électricité hydraulique divisée par la production totale d'ELR
<b>Part.eolien.PELRN</b>	La part de la production d'électricité éolienne dans la production d'ELR (%)	La production d'électricité éolienne divisée par la production totale d'ELR.
<b>Part.phot.PELRN</b>	La part de la production d'électricité photovoltaïque dans la production d'ELR (%)	La production d'électricité photovoltaïque divisée par la production totale d'ELR
<b>Part.therm.PELRN</b>	La part de la production d'électricité thermique dans la production d'ELR (%)	La production d'électricité thermique (électricité produite à partir de la biomasse (cogénération), de l'énergie solaire et de la géothermie) divisée par la production totale d'ELR.
<b>Part.biom.PELRN</b>	La part de la production d'électricité produite par la filière biomasse <sup>(2)</sup> dans la production d'ELR (%)	La production d'électricité produite par la filière biomasse divisée par la production totale d'ELR.
<b>Cons.CH. RN.hab</b>	La consommation de la chaleur renouvelable par habitant <sup>(3)</sup> (Ktep/hab)	La consommation de la chaleur renouvelable (bois énergie et énergie solaire thermique) divisée par le nombre d'habitants de la région
<b>Cons.Bioc.hab</b>	La consommation des biocarburants par habitant (Ktep /hab)	La consommation des biocarburants divisée par le nombre d'habitants de la région
<b>IE</b>	L'intensité énergétique (Tep/1000 €)	Le rapport de la consommation finale d'énergie au produit intérieur brut exprimé en volume

Notes : (1) La production totale d'ELR (hydraulique, éolien, photovoltaïque, thermique et biomasse) est utilisée pour calculer la part de l'ELR dans l'électricité globale (Part.ELRN.EPT), pour calculer la production de l'ELR par habitant

(PELRN.hab) et également pour calculer toutes les parts des EnR dans la production totale d'ELR.

(3) La production de l'électricité à partir de la biomasse provient des chaufferies de bois, des usines d'incinération de déchets et des matières végétales ou animales (cogénération) et de la production de biogaz par méthanisation. On compte uniquement l'électricité produite à partir des chaufferies de bois et de la méthanisation. Celle issue de la cogénération est comptabilisée dans l'électricité thermique.

(4) La consommation de la chaleur renouvelable est la somme de trois consommations pour le chauffage : le bois énergie (filère de la biomasse), l'énergie solaire thermique et la géothermie (variable dont on ne dispose pas).

Les statistiques élémentaires des 14 variables actives utilisées pour élaborer la typologie des régions françaises relativement au développement des EnR figurent dans le Tableau 7. L'examen des moyennes et des indicateurs de dispersion relatifs aux variables actives révèle de fortes disparités entre les régions. La part moyenne des EnR dans la consommation finale d'énergie atteint 25,44%, elle varie de 8,48% dans la région Nord-Pas-de-Calais à 60,34 % pour le Limousin. Si l'on considère le coefficient de variation qui permet de comparer le niveau d'homogénéité ou de dispersion relative des données autour de la moyenne, il varie de 22,52 % pour la consommation de combustibles fossiles par habitant à 132,84 % pour la production d'électricité nucléaire par habitant. Hormis la consommation de combustibles minéraux solides par habitant, la consommation des biocarburants par habitant et l'intensité énergétique semblent relativement homogènes au sein des 22 régions, le mix énergétique présente de fortes spécificités régionales. Nous notons que les productions d'électricité nucléaire et d'électricité primaire par habitant ainsi que les parts de la biomasse, de l'éolien, du photovoltaïque, du thermique et de l'hydraulique dans la production totale d'électricité renouvelable varient fortement, ce qui témoigne d'un développement régional des EnR très contrasté

**Tableau 7** : Statistiques sommaires

	<b>Moyenne</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Ecart- type (N)</b>	<b>Coefficient de Variation (%)</b>
Part.ENR.CFTE (%)	25,44	8,48	60,34	16,16	63,52
Part.ELRN.EPT (%)	43,49	2,56	99,18	34,80	80,02
PELRN.hab (Gwh/hab)	1,63E-03	1,61E-04	4,62E-03	1,27E-03	77,91
PTEM.hab (Gwh/hab)	8,68E-03	5,89E-04	2,96E-02	9,12E-03	105,07
PEN.hab(Gwh/hab)	7,37E-03	0,00	3,07E-02	9,79E-03	132,84
CCF.hab (Ktep/hab)	1,23E-03	8,00E-04	1,78E-03	2,77E-04	22,52
Part.hydr.PELRN (%)	36,70	0,04	95,88	34,66	94,44
Part.eol.PENR(%)	34,35	0,00	87,41	30,33	88,30
Part.phot.PELRN(%)	10,16	1,24	27,09	7,77	76,48
Part.therm.PELRN(%)	9,24	0,00	53,81	12,08	130,74
Part.biom.PELRN(%)	9,56	1,13	38,20	8,31	86,92
Cons.CH.RN.hab(Ktep/hab)	2,30E-04	6,59E-05	6,45E-04	1,42E-04	61,74
Cons.Bioc.hab (Ktep/hab)	6,17E-05	3,23E-05	1,16E-04	1,52E-05	24,64
IE (Tep/1000 €)	8,73E-02	3,20E-02	1,37E-01	2,09E-02	23,94

Etant donné les différences des unités de mesure des variables et les écarts importants entre les dispersions des variables, nous avons choisi de travailler sur des données centrées et réduites.

Afin de décrire *a posteriori* les classes de régions selon le développement des EnR caractérisées par les variables actives, nous considérons un large éventail de variables dites illustratives (voir Annexe Tableau A1) permettant de mieux comprendre les spécificités régionales en termes de bouquet énergétique et de développement des EnR. Ces variables sont susceptibles de fournir des informations supplémentaires pour consolider et enrichir l'interprétation interne ou la caractérisation des classes de régions par les variables actives. Elles n'influent en aucun cas sur la détermination des classes, mais peuvent éventuellement apporter une interprétation externe à ces classes. Elles sont positionnées et projetées comme des variables supplémentaires dans l'analyse multidimensionnelle des variables actives. Nous considérons six thématiques regroupant des variables représentatives des caractéristiques : i) environnementales, ii) démographiques, iii) du développement économique, iv) de la spécialisation sectorielle, v) climatiques et géographiques, ainsi que vi) des spécificités politiques. Dans un second temps, nous explorons les liens entre la partition des régions réalisée et ces variables.

Les variables environnementales concernent en particulier les émissions de gaz à effet de serre (GES), des mesures de dégradation de l'environnement ainsi que des dépenses pour la protection de l'environnement. De nombreux travaux (par exemple Sadorsky (2009a), Vanruijven et Vanvuyen, (2009)) suggèrent que les préoccupations environnementales incitent à une utilisation accrue des EnR. Marques et al. (2010) ont montré que le niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> constitue un facteur déterminant du déploiement des EnR dans 24 pays européens sur la période 1990-2006. Des différences régionales relatives à la qualité de l'environnement sont susceptibles d'entraîner un développement contrasté des EnR. Nous supposons qu'un niveau élevé de GES est de nature à promouvoir les EnR.

Les variables économiques se réfèrent aux performances économiques (PIB par habitant, taux de croissance du PIB, taux de chômage, dépenses pour l'éducation, la santé, la R&D, ...) ainsi qu'à la structure de l'économie (spécialisation sectorielle : parts relatives des différents secteurs et branches industrielles dans la VA et dans l'emploi). Une littérature abondante (Sadorsky (2009b), Marques et al. (2010), Apergis et Payne (2011), Apergis et Danuletiu (2014)) a établi un lien positif entre la croissance économique et l'utilisation des EnR. L'étude de Sadorsky (2009b) portant sur les pays du G7, met en exergue une relation positive entre la consommation des EnR et la croissance économique ainsi qu'une causalité bidirectionnelle. Dans le long terme, l'augmentation du PIB réel par habitant apparaît comme un déterminant principal de la consommation d'EnR. Apergis et Danuteliu (2014) ont examiné la relation entre la consommation d'EnR et la croissance économique pour 80 pays. Leurs résultats indiquent qu'il existe à long terme une relation positive entre la consommation des EnR et le

PIB réel et confirment que la consommation d'EnR favorise la croissance économique qui à son tour stimule le recours aux sources d'EnR. Un niveau de revenu plus élevé signifie un plus grand potentiel à supporter des coûts réglementaires élevés (ce qui peut entraîner à la fois des prix et des taxes plus élevés) et également plus de ressources disponibles pour mettre en œuvre et promouvoir des alternatives environnementales durables (et une plus grande utilisation des EnR). Selon Zuindeau (2005), l'accès à un certain seuil de développement tend «la croissance vertueuse ». Plusieurs arguments plaident en faveur de cette vision « optimiste » de la croissance: i) le développement économique et son corollaire la tertiarisation de l'économie réduisent l'impact environnemental, ii) l'accroissement du niveau d'éducation et du niveau de vie peuvent induire une forte sensibilité aux préoccupations environnementales et modifier les comportements de consommation, enfin iii) l'innovation et le progrès techniques contribuent activement au développement des techniques de dépollution et à la mise en place de technologies propres. Nous ne supposons donc que les disparités régionales en termes de performance économique et de spécialisation sectorielle (Sterlacchini (2006), Beugelsdijk et al. (2018)) peuvent induire des mix énergétiques différenciés ainsi qu'un développement contrasté des EnR. Par ailleurs, divers travaux ont souligné les retombées économiques positives de la transition énergétique sur la croissance et l'emploi, on peut citer Blazejczak et al. (2014) et Lehr et Ulrich (2017) pour l'Allemagne et Bulavskaya et Reynes (2018) pour les Pays-Bas et l'ADEME (2016) pour la France. En matière d'emploi, des impacts très importants, à la fois négatifs et positifs, inégalement répartis selon les secteurs et les régions, sont inéluctables. S'il y a consensus sur ce point, l'ampleur de ces effets et les échelles de temps concernées s'avèrent très difficiles à évaluer. Leur taille dépend fortement des conditions et des politiques du marché du travail et de la capacité des pays à développer des filières industrielles dans le domaine des EnR (Blazejczak et al. (2014), Cour des comptes (2018)).

Les variables démographiques (population, densité de population, urbanisation) sont prépondérantes pour évaluer les consommations énergétiques. Salim et Shafiei (2014) ont analysé l'impact de l'urbanisation sur la consommation des énergies renouvelables et non renouvelables dans les pays de l'OCDE sur la période 1980-2011. Leurs résultats attestent que l'urbanisation a contribué à la croissance totale de la consommation d'énergie et en particulier à la croissance des consommations d'énergies non renouvelables. Ils ont également mis en évidence une relation significativement négative entre la densité de la population et la consommation d'énergie non renouvelable. En revanche, aucune relation significative n'a pu être établie entre l'urbanisation et l'utilisation des EnR. Yang et al. (2016) ont montré que l'urbanisation a un effet positif sur la croissance de la consommation des EnR en Chine. Si la relation entre les variables démographiques et le développement des EnR à l'échelle régionale ne semble pas évidente, on peut cependant conjecturer que les solutions énergétiques dans un territoire urbain ou rural seront différentes. Par exemple, les

parcs éoliens et photovoltaïques se développeront en milieu rural.

Les consommations et productions d'énergie sont étroitement liées aux variables climatiques et géographiques. La production d'électricité française est concentrée dans certaines zones du territoire national : l'hydraulique s'est développé dans les régions montagneuses ayant des réserves en eau, le nucléaire nécessite également des ressources en eau importantes, l'éolien devrait se développer plutôt dans des régions fortement exposées au vent, le photovoltaïque dans les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement.

Cadoret et Padovano (2016) mettent en évidence le rôle des facteurs politiques dans le développement des EnR dans 26 pays européens sur la période 2004-2011. Ils constatent que le lobbying de l'industrie manufacturière retarde le déploiement de l'EnR, alors que la qualité de la gouvernance a un effet positif. Enfin, ils observent que le poids des partis de gauche favorise l'utilisation des EnR. Marques et al (2010) soulignent également que le lobby des industries des hydrocarbures constitue un frein au déploiement des EnR. Nous supposons qu'à l'échelle régionale, le poids des partis « verts » peut influencer l'essor des EnR au même titre que l'adoption d'objectifs SCRAE ambitieux.

## **Section 2 : Les résultats empiriques**

Dans le but d'étudier l'engagement des régions dans la transition énergétique et leur performance en termes de développement des EnR, nous utilisons des méthodes d'analyse multidimensionnelles. Il s'agit dans un premier temps d'élaborer une typologie des régions françaises selon le développement des EnR en France pour l'année 2015 afin de mettre en évidence les similitudes et les dissemblances entre régions. Pour enrichir les profils des classes de régions établies nous introduisons *a posteriori* dans l'analyse de nombreuses variables regroupées en six thèmes. Cette première étape est essentiellement une analyse descriptive multidimensionnelle. Dans un second temps, nous explorons les liens entre la partition des régions réalisée et les variables thématiques. L'objectif est de mieux appréhender les mécanismes du développement territorial des EnR et les différences observées. Nous recourons à des analyses bivariées<sup>27</sup> ainsi qu'à des analyses multivariées en l'occurrence des analyses discriminantes (AD) (Celleux, 1990 et Huberty, 1994) afin de repérer les classes qui se différencient par rapport aux variables des différents thèmes retenus et d'identifier les variables qui ont un effet sur le développement régional des EnR.

---

<sup>27</sup>Des tests de comparaison de moyennes (ANOVA - Analyse Of Variance - à un facteur contrôlé) et des tests de comparaison de proportions (analyses des correspondances simples basées sur le test d'indépendance du khi-deux).



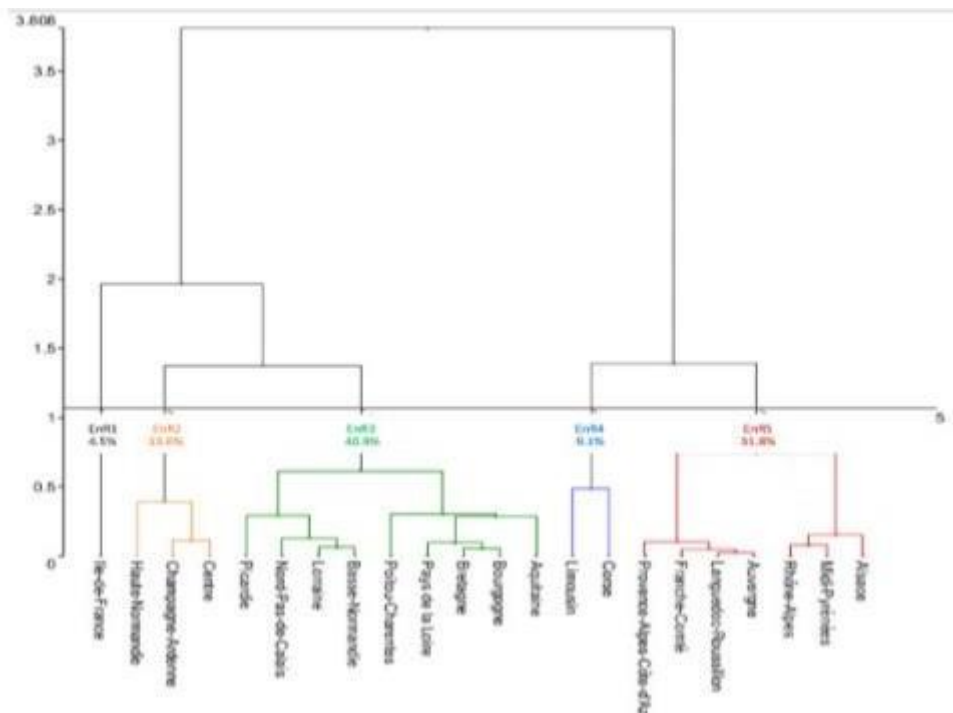
L'approche adoptée repose sur une complémentarité de méthodes d'analyses de données multidimensionnelles qui tiennent compte des caractéristiques du développement des EnR des régions. Une méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (Lebart et al. (2000), Saporta, 2006) selon le critère de Ward<sup>28</sup>, a été appliquée sur les facteurs principaux de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des caractéristiques du développement des EnR. Le dendrogramme de la figure 10 produit par la classification représente l'arbre hiérarchique des 22 régions selon le développement des EnR en France. La CAH a conduit à une « meilleure » partition en cinq classes homogènes. Le Tableau A2 présenté en annexe résume les principaux résultats de la caractérisation statistique en termes de développement des EnR, de la partition retenue en cinq classes, obtenue par coupure de l'arbre hiérarchique de la Figure 10.

La classification établie met en évidence des spécificités régionales et des performances contrastées entre les régions en matière de développement des EnR. Le tableau A2 présenté en annexe résume la description des classes de la typologie selon les variables des six thématiques illustratives considérées. Un nom générique spécifique a été attribué à chacune des cinq classes. Pour mieux visualiser les cinq classes identifiées, nous les avons représentées sur la Figure 11.

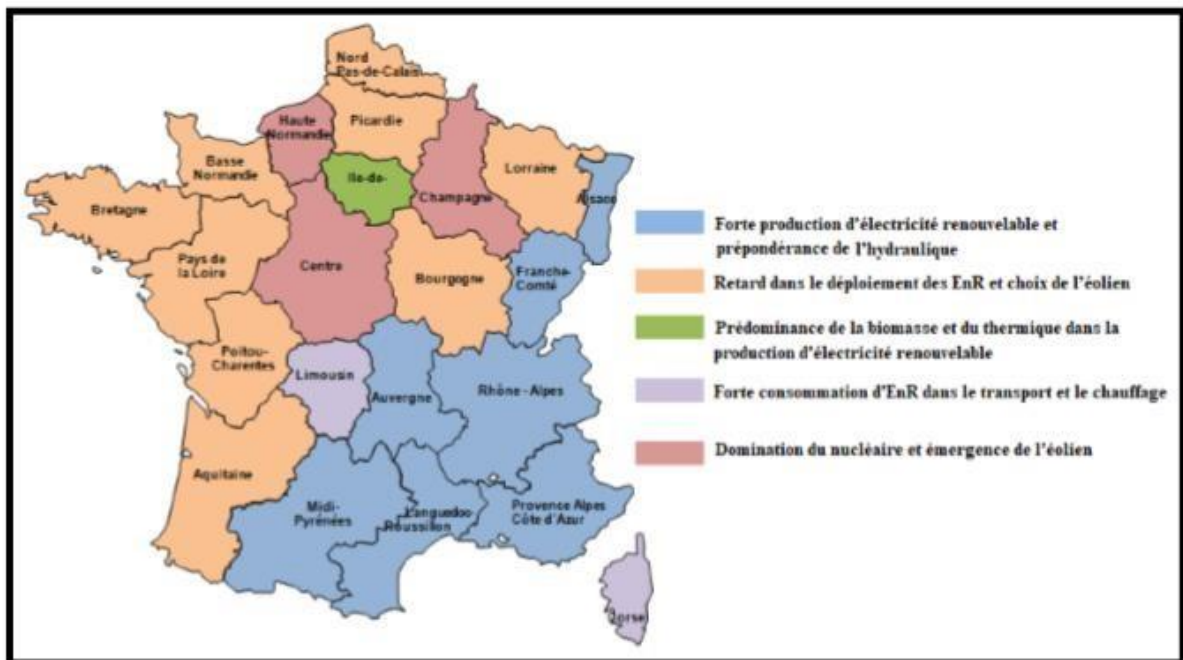
---

<sup>28</sup> Critère qui consiste en un gain d'inertie intra-classe à chaque agrégation ou regroupement de deux classes en une seule ou la perte de l'inertie interclasse due à cette agrégation.

**Figure 10 :** Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR en 2015



**Figure 11 :** Répartition des régions françaises selon le développement des ENR en 2015



## **Classe EnR1 : Prédominance de la biomasse et du thermique dans la production d'électricité renouvelable**

La première classe est constituée d'une seule région, l'Ile de France. La production d'électricité de l'Ile de France est largement orientée vers la biomasse et le thermique. Les parts de la production d'électricité produite par les filières bioénergie et thermique sont significativement supérieures aux moyennes nationales, elles atteignent respectivement 38% et 54 % en 2015, contre seulement 9,5% et 9% pour l'ensemble des régions. Cette classe se caractérise également par une forte efficacité énergétique : l'intensité énergétique s'établissait à un niveau très inférieur (0,03199 tep/1000€) à celui de la moyenne nationale (0,087 tep/1000€). Les productions totales d'électricité primaire et d'électricité nucléaire par habitant ainsi que la consommation de combustibles fossiles par habitant sont significativement inférieures aux moyennes nationales.

Nous constatons que la région fictive des DOM est affectée *a posteriori* à la classe EnR1, car elle présente des caractéristiques similaires à celles de l'Ile de France en matière de développement des EnR. En effet, les DOM se distinguent notamment par l'importance des filières bioénergie et thermique<sup>29</sup> dans la production d'électricité (respectivement 45,7 % et 14,3%), l'absence de nucléaire, une production d'électricité primaire par habitant et une intensité énergétique faibles.

Il s'agit d'une région fortement peuplée et urbanisée à forte densité de population. La population est plus éduquée que la moyenne nationale, le niveau de vie, évalué par le PIB par habitant et le revenu par habitant, est également significativement plus élevé. L'Ile de France affiche une forte spécificité sectorielle avec une tertiarisation marquée de l'économie : le poids des services dans la valeur ajoutée atteint 87 % contre 74 % pour la moyenne nationale alors que les poids de l'agriculture et de l'industrie sont plutôt faibles. L'emploi dans le secteur des services en % de l'emploi total est également significativement élevé. La région Ile de France est celle qui consacre le plus faible montant d'investissement pour lutter contre la pollution de l'air et le climat, elle dépense 1,07 euros par habitant alors que la moyenne nationale est de 5,82 euros par habitant. Enfin, nous observons que le score des partis

---

<sup>29</sup> La centrale géothermique de Bouillante est la seule centrale géothermique haute température en France. Elle produit près de 5% de l'électricité de la Guadeloupe, ce qui permet d'alimenter près de 15 000 logements.

écologistes obtenu aux élections régionales est significativement supérieur à la moyenne des scores réalisés sur les 22 régions (8,3% contre 4,2%).

Notons, que la production d'électricité en Île-de-France couvre en moyenne 5 % de la consommation régionale. La région dépend donc largement des régions voisines excédentaires pour importer l'électricité dont elle a besoin. De plus, bien qu'étant la région la plus riche de France, l'Île de France ne présente pas une consommation d'EnR supérieure à la moyenne nationale. La région est même très en retard par rapport à l'objectif fixé dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) d'atteindre 23 % d'EnR dans la consommation totale à l'horizon 2020, cette part s'établissait à 9% en 2015. Il apparaît qu'à l'échelle régionale la relation positive entre la croissance économique et la consommation d'EnR (Zuindeau (2005), Sadorsky (2009b), Marques et al. (2010), Apergis et Payne (2011), Apergis et Danuletiu (2014)) n'est pas avérée. Le faible développement des EnR peut être lié à la forte densité de la population (Salim et Shafiei, 2014) et à son urbanisation qui restreignent le développement de grands parcs éoliens et photovoltaïques. Enfin, contrairement aux conclusions établies par Cadoret et Padovano (2016), le poids des partis écologistes ne se traduit pas par une utilisation soutenue des EnR.

### **Classe EnR2 : Domination du nucléaire et émergence de l'éolien**

Cette classe est constituée de 3 régions : le Centre, la Haute-Normandie et la Champagne-Ardenne. Ces régions sont fortement productrices d'électricité primaire principalement d'origine nucléaire. Les productions d'électricité primaire et nucléaire par habitant sont significativement supérieures à la moyenne nationale. Ces trois régions totalisent 22 des 58 réacteurs nucléaires installés en France, elles contribuent largement à l'approvisionnement en électricité de la région Ile de France, qui leur est frontalière. La part de l'électricité renouvelable dans la production d'électricité primaire est faible, elle atteignait 4,81% en 2015, contre 43,49% pour l'ensemble des régions. Le bouquet énergétique de cette classe est donc peu diversifié. L'éolien est l'énergie renouvelable dominante pour la production d'électricité renouvelable, sa part était de 66,02 % en 2015 et se situait largement au-dessus de la moyenne nationale (34,35%). En revanche, la part de l'hydraulique est significativement inférieure à la moyenne nationale (5,54 % contre 36,70%).

Ces régions affichent une forte spécificité sectorielle, ce sont des régions plutôt très industrialisées et peu orientées vers les services. La part de l'industrie dans la valeur ajoutée ainsi que la production industrielle par habitant sont élevées alors que la part des services dans la valeur ajoutée est plutôt faible. Le tissu industriel régional est caractérisé par l'implantation d'industries "lourdes", intensives en énergie. La part des secteurs de la cokéfaction et du raffinage dans la valeur ajoutée est très forte (1,76% contre 0,42% au niveau national). Cette classe présente également un taux de croissance du PIB par habitant inférieur à la moyenne nationale, il s'établissait à 0,42% en 2015 contre 1,48% pour l'ensemble des régions métropolitaines.

Nous remarquons que les variables environnementales sont très significatives dans cette classe. Les régions présentent un niveau élevé d'émissions de gaz à effet de serre. Pour lutter contre la pollution de l'air et le réchauffement climatique, liées à la présence d'industries fortement émettrices ; ces régions investissent énormément et consacrent en moyenne 14,57 € par habitant alors que la moyenne nationale se situe à seulement 5,81 € par habitant.

### **Classe EnR3 : Retard dans le déploiement des EnR et choix de l'éolien**

Cette classe regroupe 9 régions : la Basse-Normandie, l'Aquitaine, la Bourgogne, la Bretagne, la Lorraine, la Nord-Pas-de-Calais, les Pays de la Loire, la Picardie et le Poitou-Charentes. Dans cette classe le développement des EnR accuse un retard important, la production d'électricité renouvelable par habitant est de  $8,1 \cdot 10^{-4}$  Gwh/hab contre  $16,6 \cdot 10^{-4}$  Gwh/hab au niveau national et la part des EnR dans la consommation finale totale d'énergie est également significativement inférieure (17,21% contre 25,44%). La production d'électricité d'origine hydraulique est limitée, elle représente 11,92% de l'électricité renouvelable produite, contre 36,70% au niveau national. Comme dans la classe EnR2, l'éolien se place en première position pour la production d'EnR, sa part est significativement supérieure à la moyenne nationale, elle était de 54,56 % en 2015 (34,35% pour la France métropolitaine). Dans cette classe, la part de la production d'électricité photovoltaïque dans la production d'EnR se situe à un niveau supérieur à la moyenne nationale puisqu'elle atteint 13,46% avec des niveaux records en Poitou-Charentes (27,1%) et en Aquitaine (24,1%), contre seulement 10,15% en moyenne pour la France métropolitaine. Cette classe se caractérise également par une faible efficacité énergétique : l'intensité énergétique s'établissait à un niveau très supérieur (0,0976 tep/1000€) à celui de la moyenne nationale (0,087tep/1000€).

L'emploi dans le secteur agricole ainsi que la part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la fabrication de denrées alimentaires, de boissons et de produits à base de tabac restent importants dans ces régions. Nous observons également des dépenses en R&D par habitant plutôt faibles, ce qui peut constituer un frein au développement des EnR. Zuideau (2015) souligne que l'innovation et le progrès techniques sont favorables au déploiement de technologies propres. Le climat est majoritairement de type continental, le nombre d'heures d'ensoleillement annuel est plutôt inférieur à la moyenne nationale. Cette classe regroupe les régions du Nord et de l'Ouest de la France constituées de plaines, de bas-plateaux et de larges vallées, elle présente donc un faible potentiel hydraulique. Enfin, ces régions se sont fixées un objectif peu ambitieux en matière de développement des énergies renouvelables, l'objectif retenu dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) est de 23,3% d'EnR dans la consommation totale d'énergie à l'horizon de 2020 alors que la moyenne nationale s'établit à 27,4%. Les régions Pays de la Loire et Picardie apparaissent les moins impliquées avec des objectifs respectifs de 15 % et 21%.

#### **Classe EnR4 : Forte consommation d'EnR dans le transport et le chauffage**

La quatrième classe regroupe le Limousin et la Corse, ce sont les régions les plus performantes en termes de consommation d'EnR, leur part dans la consommation finale totale d'énergie atteignait 57,02% (60,34% pour le Limousin et 53,69% pour la Corse), contre 25,44% pour l'ensemble des régions métropolitaines en 2015. Les EnR sont largement consommées dans les secteurs du transport et de la chaleur. Ainsi, les consommations par habitant de chaleur d'origine renouvelable - biomasse et énergie solaire thermique - ( $6,2 \cdot 10^{-4}$  contre  $2,3 \cdot 10^{-4}$  Ktep/hab) et de biocarburants ( $9,4 \cdot 10^{-5}$  contre  $6,2 \cdot 10^{-5}$  Ktep/hab) sont significativement plus élevées que la moyenne nationale. Cette classe est également caractérisée par une faible consommation des combustibles fossiles ( $0,810^{-3}$  contre  $1,210^{-3}$  Ktep/hab). En ce qui concerne les productions d'électricité, la classe 4 ne se différencie pas significativement des moyennes des 22 régions métropolitaines.

La population est plutôt vieillissante, la proportion de la population âgée de plus de 40 ans est supérieure à la moyenne nationale alors que la part de la population âgée de moins de 20 ans est sous-représentée. Au regard des indicateurs de performance économique, ces régions se distinguent par des dépenses par habitant plutôt élevées concernant à la fois les dépenses totales, les dépenses d'investissement et les dépenses pour l'éducation. De plus, le tissu industriel de ces régions est basé principalement sur les secteurs de la construction et de l'industrie extractive, l'énergie, l'eau, la gestion des déchets et de la dépollution. Les parts des

valeurs ajoutées de ces secteurs dans la valeur ajoutée industrielle sont plutôt élevées par rapport aux parts moyennes nationales. En revanche, la part du secteur de la fabrication d'autres produits industriels (fabrication de textile, Industrie de papier, Industrie chimique et pharmaceutique, fabrication de produits métalliques, en caoutchouc et en plastique) dans la valeur ajoutée industrielle est plutôt faible. Les températures, les heures d'ensoleillement ainsi que la vitesse moyenne du vent sont plutôt supérieures aux moyennes nationales, ce qui devrait favoriser l'essor des filières éolienne et photovoltaïque, néanmoins ces régions ne se distinguent pas des moyennes nationales. Dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE), ces régions se sont fixées un objectif particulièrement ambitieux en matière de développement des EnR: 39% de la consommation totale à l'horizon de 2020. Notons que cet objectif est d'ores et déjà atteint puisque la part des EnR dans la consommation finale totale d'énergie était de 57,02% en 2015. Enfin, nous observons que le score des partis écologistes obtenu aux élections régionales de 2015 est plutôt faible par rapport à la moyenne des scores sur les 22 régions (0,93% contre 4,19%). Il semble qu'au niveau régional le score des partis écologistes n'influence pas le développement des EnR, contrairement au résultat établi par Cadoret et Padovano (2016) pour les pays européens.

### **Classe EnR5 : Forte production d'électricité renouvelable et prépondérance de l'hydraulique**

Cette dernière classe, rassemble les régions : Alsace, Auvergne, Franche-Comté, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Ces régions sont leaders en termes de production d'électricité renouvelable. En effet, la production d'électricité renouvelable par habitant ( $2,7 \cdot 10^{-3}$  contre  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Gwh/hab) ainsi que sa part dans l'électricité primaire totale (66,74% contre 43,49%) sont significativement supérieures aux moyennes nationales. La production d'électricité renouvelable est essentiellement d'origine hydraulique (77,89%, contre 36,70% pour la moyenne nationale). Les parts des filières biomasse et éolienne dans la production d'électricité renouvelable sont significativement inférieures aux moyennes de l'ensemble des régions métropolitaines, elles atteignaient respectivement 3,24 % et 8,21% contre respectivement 9,56% et 34,35% pour l'ensemble des 22 régions.

Ces régions exhibent un niveau de dépenses par habitant en R&D plutôt élevé, propice au développement des EnR (Zuindeau (2015)). En revanche les dépenses par habitant pour l'éducation se situent en dessous de la moyenne nationale. Le secteur agricole est peu développé : les parts du secteur agricole en termes de valeur ajoutée et d'emplois sont faibles.

Ces régions bénéficient plutôt d'une façade maritime et d'une superficie de forêts importantes, d'un nombre d'heures d'ensoleillement annuel élevé, ce sont des régions montagneuses, ce qui favorise la production d'électricité d'origine hydraulique.

Ces résultats révèlent de fortes spécificités régionales en matière de mix énergétique et de développement des EnR : 5 types de développement des EnR émergent ont été mis en évidence pour la France métropolitaine en 2015. Par ailleurs, nous observons que les variables des six thèmes illustratifs considérés ont permis d'enrichir les profils des classes de la typologie régionale des EnR.

A titre illustratif, nous avons également projeté le pays France, noté PFR, représentant les caractéristiques du développement des EnR de la France en 2015. Nous observons que ce pays PFR est affecté *a posteriori* à cette classe de régions EnR5. Ce résultat souligne que le profil type du développement des EnR pour la France métropolitaine en 2015 ressemblait plus au profil régional de cette classe EnR5, caractérisé par une forte production d'électricité renouvelable et une prépondérance de l'hydraulique. En 2015, la production d'électricité renouvelable en France reste largement tributaire de l'hydraulique<sup>30</sup>.

## **2.1 Les déterminants du développement territorial des EnR**

L'objectif d'une CAH est purement descriptif, nous avons utilisé les données pour caractériser des classes inconnues et homogènes d'observations selon un ensemble de variables relatives au développement des EnR. Dans cette section, nous explorons les liens entre la partition des régions réalisée et les variables additionnelles relatives aux six thématiques. Deux approches complémentaires ont été mises en œuvre : des analyses bivariées et des analyses discriminantes (AD).

### *2.1.1 Les effets du développement régional des EnR sur les variables thématiques*

Le Tableau A3 présenté en annexe résume les modèles bivariés des effets du type de développement régional des EnR en France en 2015 sur chaque variable thématique continue (ANOVA) et sur chaque variable thématique nominale : le Type de Climat (TC) et la Couleur Politique (CP) du conseil régional élu (test d'indépendance du khi-2).

Par exemple, en ce qui concerne l'effet du facteur contrôlé « Développement régional des EnR en France 2015 » à cinq niveaux ou types de développement sur la variable population

---

<sup>30</sup>L'hydraulique représentait 61,1 % de la production française d'électricité renouvelable en 2015.



du thème démographie, le modèle ANOVA est significatif dans son ensemble. En effet, la p-valeur observée ( $Pr > F = 0,01\%$ ) du test de Fisher est inférieure au seuil de signification fixé à 5%. En conséquence, on peut rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des populations moyennes selon les types de développement des EnR. Il y a donc bien des disparités des populations selon le type de développement des EnR. La classe EnR1 a une population significativement plus importante que celles des quatre autres classes d'EnR. Ainsi, pour le thème démographie, il s'avère que le type de développement des EnR n'est pas une source d'hétérogénéité qui peut avoir une influence sur le taux d'urbanisation ou sur la part de la population âgée de 40 à 59.

De même pour le thème performances économiques, le développement régional des EnR a un effet significatif sur chacune des variables thématiques, sauf sur le taux de croissance du PIB par habitant, le taux de chômage et sur la production industrielle par habitant. A l'échelle des régions métropolitaines françaises, il apparaît que pour l'année 2015, le développement des EnR ne s'accompagne pas d'effets positifs sur la croissance et l'emploi contrairement aux résultats établis par Blazejczak et al. (2014), Lehr et Ulrich (2017), Bulavskaya et Reynes (2018) et l'ADEME (2016). Ce résultat doit être nuancé car l'analyse des effets du développement des EnR sur l'économie requiert la prise en compte d'une période de temps suffisamment longue pour que les ajustements puissent être réalisés.

Quant au thème spécialisation sectorielle, le développement régional des EnR a bien un effet significatif sur la part des services, sur la part de l'industrie, sur l'emploi dans le secteur agricole et sur l'emploi dans le secteur des services.

On peut conclure, avec un risque d'erreur de 5%, qu'il n'y a pas de disparité des variables environnementales et politiques selon le type de développement des EnR.

Au niveau climatique et géographique, on note des disparités selon les types de développement régional des EnR en ce qui concerne l'altitude (le point culminant des massifs), les heures d'ensoleillement et dans une moindre mesure la vitesse moyenne du vent (avec un risque d'erreur de 5,11%). Au vu des moyennes d'heures d'ensoleillement et de vitesse du vent significativement élevées observées en 2015 dans les régions des classes d'EnR 4 et 5, on aurait pu s'attendre à plus de photovoltaïque et d'éolien dans ces régions.

### 2.1.2 Effets discriminants des six thèmes sur le développement régional des EnR

Statistiquement, l'AD est une méthode multivariée<sup>31</sup> qui consiste à étudier l'effet d'un ensemble de variables explicatives quantitatives d'un thème homogène sur une variable qualitative à expliquer, en l'occurrence ici, la variable qualitative types de développement des EnR des 22 régions métropolitaines de France en 2015 caractérisée précédemment par la CAH. On peut observer que l'approche de l'AD est proche de celle de la régression. Dans chacun des cas, on essaye d'expliquer ou de prédire une variable dépendante par une combinaison linéaire de variables explicatives. En régression la variable expliquée est continue ou quantitative, en AD elle est qualitative. Six thèmes explicatifs sont considérés : l'environnement, la démographie, les performances économiques, la spécialisation sectorielle, le climat et la géographie ainsi que la politique (voir tableau A2 en annexe). En d'autres termes, pour chacune de ces thématiques, nous allons d'une part, déterminer quelles sont les caractéristiques qui expliquent et donc qui discriminent et séparent au mieux les classes régionales du développement des EnR et d'autre part, comprendre et interpréter la nature de ces différences. De plus, l'AD permet d'élaborer une règle de décision que l'on utilise ensuite pour classer la région anonyme DOM dans la classe la plus proche, selon ses caractéristiques thématiques, des cinq classes régionales du développement des EnR.

Le tableau 8 résume les principaux résultats des modèles d'analyse discriminante<sup>32</sup> par thème. Le modèle retenu selon la spécialisation sectorielle est significatif dans son ensemble. En effet, la probabilité critique ou la p-valeur ( $Pr > F = 0,83\%$ ) de l'approximation de la statistique de Wilks par la loi de Fisher est inférieure au seuil de significativité fixé à 5%. On peut donc conclure qu'il y a bien un effet significatif de la spécialisation sectorielle sur le type de développement régional des EnR en France 2015. Parmi les neuf variables explicatives introduites dans le modèle, seules les variables Ser.VA et VA.IEEED.VAI sont discriminantes. Ces deux variables discriminantes significatives différencient la région Ile de France de la classe EnR1, caractérisée par une part des services dans la valeur ajoutée et une part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la fabrication d'équipements électriques et

<sup>31</sup>L'AD est une méthode décisionnelle de classement. Elle consiste d'une part, à déterminer parmi les variables explicatives celles qui sont discriminantes. L'AD est une ACP particulière, elle produit des facteurs discriminants qui sont des combinaisons linéaires des variables explicatives et établit des représentations graphiques sur des plans factoriels discriminants permettant de séparer le mieux possible les classes, puis d'expliquer leurs positionnements respectifs. Et d'autre part, elle permet de classer de nouvelles données explicatives anonymes dans ces classes connues à partir des fonctions linéaires discriminantes établies précédemment. On distingue par conséquent deux démarches successives, d'ordre descriptif puis décisionnel.

<sup>32</sup>L'AD repose sur la normalité des populations. Les fonctions discriminantes sont linéaires si les matrices de variances et covariances de ces populations sont égales, sinon elles sont quadratiques. Toutes ces conditions d'application sont vérifiées sauf pour la population de la classe EnR1.

informatiques et de machines dans la valeur ajoutée industrielle élevées. La région DOM est affectée dans la classe EnR1.

Le Modèle complet d'AD constitué des dix variables de performance économique est très significatif dans son ensemble. Deux facteurs discriminants caractérisent ce modèle, le premier distingue la classe EnR2 par une production industrielle par habitant élevée et le second différencie la classe EnR1 de l'Ile de France, par un PIB par habitant élevé. Ce modèle significatif dont le taux d'erreur est de 9,09%, a affecté la région DOM dans la classe EnR4 constituée des régions de la Corse et du Limousin.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle des disparités régionales en termes de spécialisation sectorielle et de performance économique (Sterlacchini (2006), Beugelsdijk et al. (2018)) induisent des mix énergétiques différenciés ainsi qu'un développement contrasté des EnR.

Quant à l'analyse de l'effet de la thématique environnementale sur le type de développement régional des EnR, aucun des modèles, complet et réduits appliqués, n'est significatif ( $Pr > F > 5\%$ ). On peut donc conclure qu'aucune de ces cinq caractéristiques de l'environnement n'a d'effet significatif sur la partition du développement régional des EnR en France métropolitaine en 2015. Contrairement aux résultats établis par de nombreux auteurs à l'échelle des pays (Sadorsky (2009a), Van Ruijven et Van Vuen, (2009)), les préoccupations environnementales ne constituent pas un facteur déterminant du développement des EnR à l'échelle des régions françaises. Ce résultat résulte de l'absence de différences significatives entre les cinq types de développement d'EnR et ce pour les cinq variables environnementales mises en évidence par les ANOVA. En particulier, un niveau comparable d'émissions de GES entre les cinq classes n'est pas susceptible d'entraîner un développement contrasté des EnR. (Marques et al.(2010)).

L'AD appliquée sur les variables démographiques, est très significative dans son ensemble. Parmi les variables explicatives introduites dans le modèle, seule la densité, le taux d'urbanisation et la part de la population âgée de 0 à 19 ans ont un effet significatif discriminant sur le développement régional des EnR. Ce sont les caractéristiques fortes qui distinguent la région d'Ile de France (classe EnR1) des autres classes. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Salim et Shafiei (2014) et Yang et al. (2016), la densité de la population et le taux d'urbanisation sont des facteurs clés du développement des EnR. Quant à la région DOM, le modèle décisionnel l'a affectée et considérée comme proche des régions de la classe EnR2.

**Tableau 8 : Synthèse des résultats des Analyses Discriminantes par thème**

Statistiques multivariées et Approximations F				Spécialisation sectorielle			
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F				
Wilks' Lambda	0,0348	2,91	0,0011**				
Variable	Agr.VA	Ser.VA	VA.IEEED.VAI	VA.CR.VAI	ESAET	ESIET	Taux d'erreur de classement
R-Carré	0,3538	0,6003	0,4883	0,3248	0,3822	0,3693	18,18%
Valeur F	1,78	6,38	3,82	1,44	2,32	2,05	Affectation de la région DOM
Pr > F	0,1932	<b>0,0025**</b>	<b>0,0230*</b>	0,2794	0,1044	0,1423	EnR1

Statistiques multivariées et Approximations F				Performances économiques			
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F				
Wilks' Lambda	0,0011	4,01	<0,0001**				
Variable	Pib.val.hab	TC.Pib.hab	R.hab.val	Tx.C	Inv.hab	Taux d'erreur de classement	
R-Carré	0,6350	0,1770	0,5275	0,6105	0,2648	9,09%	
Valeur F	3,48	0,43	2,23	3,13	0,72		
Pr > F	0,0628	0,7835	0,1551	0,0792	0,6016		
Variable	BR.hab	DE.hab	DS.hab	D.R&D.hab	PI.hab	Affectation de la région DOM	
R-Carré	0,3225	0,5363	0,2697	0,5208	0,6617	EnR4	
Valeur F	0,95	2,31	0,74	2,17	3,91		
Pr > F	0,4824	0,1454	0,5914	0,1625	0,0477*		

Statistiques multivariées et Approximations F				Environnement			
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F				
Wilks' Lambda	0,2857	1,01	0,4691				
Variable	EGES.hab	CN	MT.ICA.hab	D.Invest	D.Fonct	Taux d'erreur de classement	
R-Carré	0,2195	0,2660	0,2480	0,2489	0,1595	45,45%	
Valeur F	0,91	1,18	1,07	1,08	0,62	Affectation de la région DOM	
Pr > F	0,4846	0,3657	0,4095	0,4073	0,6584		

Statistiques multivariées et Approximations F				Démographie				
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F					
Wilks' Lambda	0,0062	4,54	<0,0001**					
Variable	Pop	Dens	TU	%P.0-19	%P.20-39	%P.40-59	Part.dip	Taux d'erreur de classement
R-Carré	0,4320	0,8690	0,6836	0,6166	0,2795	0,1348	0,2234	27,27%
Valeur F	2,09	18,25	5,94	4,42	1,07	0,43	0,79	Affectation de la région DOM
Pr > F	0,1504	0,0001**	0,0085**	0,0225*	0,4182	0,7853	0,5548	EnR2

Statistiques multivariées et Approximations F				Climat et Géographie				
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F					
Wilks' Lambda	0,0183	2,98	0,0007*					
Variable	Sup	Temp	Enso	Vent	F.M	C.Eau	P.Culm	Taux d'erreur de classement
R-Carré	0,4047	0,3033	0,4229	0,3615	0,4405	0,5250	0,5494	9,09%
Valeur F	1,87	1,52	2,20	2,12	2,56	4,42	5,18	Affectation de la région DOM
Pr > F	0,1860	0,2489	0,1307	0,1283	0,0887	<b>0,0135*</b>	<b>0,0065**</b>	EnR2

Statistiques multivariées et Approximations F				Politique	
Statistique	Valeur	Valeur F	Pr > F		
Wilks' Lambda	0,5074	1,62	0,1594		
Variable	SPE	Obj.SRCAE	Taux d'erreur de classement		
R-Carré	0,3052	0,2424	40,91%		
Valeur F	1,76	1,28	Affectation de la région DOM		
Pr > F	0,1869	0,3190			

Seuil de significativité : \*\* < 1% , \* ]1% ; 5%]

Le modèle d'AD appliqué sur les variables climatiques et géographiques est significatif dans son ensemble. Parmi les variables explicatives introduites dans le modèle, seules deux variables géographiques ont un effet significatif sur les types de développement régional des

EnR en France en 2015. Le premier facteur discriminant oppose les régions Corse et Limousin de la classe EnR4, caractérisées par des points culminants élevés sur leurs territoires, aux régions Centre, Champagne-Ardenne et Haute-Normandie de la classe EnR2 qui se différencie par la présence de nombreux cours d'eau. Le second facteur discriminant caractérise les régions montagneuses (points culminants élevés) des régions de la classe EnR5. Ces résultats sont intéressants, ils montrent que certaines aménités territoriales géographiques expliquent fortement le mix énergétique et le déploiement territorial des EnR : l'hydraulique s'est développé dans les régions montagneuses alors que le nucléaire a été favorisé dans les régions bénéficiant de ressources en eau importantes. En revanche, nous observons que les variables climatiques et en particulier la vitesse moyenne du vent, la température, l'ensoleillement ne constituent pas des facteurs discriminants du développement des EnR, ce qui signifie que l'éolien et le photovoltaïque se développent de manière indifférenciée sur tout le territoire français. Ces inégalités de ressources entre territoires n'influent pas sur le mix énergétique. Cette constatation soulève le problème de l'efficacité des politiques publiques en matière de transition énergétique. Par exemple, de nombreux conseils municipaux et propriétaires fonciers accueillent favorablement les projets éoliens et photovoltaïques en raison des retombées financières qu'ils génèrent sans se préoccuper de l'opportunité des investissements au regard de leurs efficacités énergétique et économique.

Aucun des modèles complet et réduits appliqués sur les variables politiques - le score des partis écologistes aux élections régionales de 2015 et la part de la production d'EnR dans la consommation finale d'énergie visée par le SRCAE pour 2020 - n'est significatif ( $Pr > F = 15,94\% > 5\%$ ). On peut donc conclure qu'il n'y a aucun effet de ces variables politiques sur le type de développement régional des EnR en 2015. Contrairement aux résultats obtenus par Cadoret et Padovano (2016) pour les pays européens, le poids des partis écologistes n'influe pas sur le développement régional des EnR en France en 2015.

Enfin, les ANOVA ont permis d'analyser les éventuelles relations d'association entre le type de développement régional des EnR en France en 2015 et chacune des variables thématiques. Les effets différentiels observés amènent à conclure à l'existence d'effets du développement régional d'EnR significatifs. Quant aux AD, elles ont permis de mettre en exergue les facteurs économiques (performance économique et spécialisation sectorielle), les spécificités démographiques et géographiques qui caractérisent et différencient les cinq types de développement des EnR en France en 2015. En revanche, les facteurs environnementaux et politiques considérés ne permettent pas de les discriminer.

## Conclusion

Bien que la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte place les territoires au cœur de l'action Climat-Air-Énergie, à ce jour, aucune étude comparative du développement des EnR n'a été réalisée à l'échelle régionale. L'originalité de la contribution réside à la fois dans la dimension spatiale retenue, la diversité des variables considérées et dans les méthodes d'analyse de données multidimensionnelles employées. L'objectif de ce chapitre était de réaliser un état des lieux de la transition énergétique en France et plus précisément d'évaluer les performances des régions en matière de diversification de leur bouquet énergétique. Nous avons mobilisé les techniques d'analyse des données afin de proposer une typologie régionale du développement des EnR pour l'année 2015 en France à partir de variables représentatives des bilans énergétiques régionaux. Un vaste ensemble de variables environnementales, économiques, démographiques, climatiques et géographiques ainsi que politiques ont été utilisées pour enrichir l'interprétation des classes de la typologie du développement régional des EnR et mieux comprendre leurs similitudes et/ou dissemblances. La classification établie met en évidence des spécificités régionales fortes et des performances contrastées entre les régions en matière de développement des EnR. Nous constatons que cinq profils types émergent, le développement des EnR s'avère très contrasté selon les filières et les régions.

Dans les trois premières classes, le développement des EnR accuse un retard considérable par rapport aux objectifs fixés dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) à l'horizon 2020. Ainsi dans la classe EnR1, constituée de la région Ile de France, la production d'électricité primaire par habitant est faible et est majoritairement assurée par la biomasse et le thermique. La classe EnR2 regroupe des régions fortement productrices d'électricité primaire essentiellement d'origine nucléaire. Ces régions sont situées à la périphérie de l'Ile de France et contribuent largement à l'approvisionnement en électricité de la région capitale. La production d'électricité d'origine renouvelable est très peu développée et s'oriente principalement vers l'éolien. La classe EnR3 Enregistre un retard important dans le déploiement des EnR, l'éolien se place également en première position suivi du photovoltaïque dans la production d'électricité renouvelable. Dans les classes EnR4 et EnR5, la part des EnR dans la consommation finale totale d'énergie s'établissait en 2015 à plus de 30% alors que la part de l'électricité renouvelable dans la production de l'électricité primaire totale était supérieure à 65%. Ces deux classes respectaient en 2015 les objectifs à atteindre à

l'horizon de 2020 dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) établis en 2012. La production d'électricité d'origine renouvelable est relativement concentrée puisque ces deux classes représentent plus de 71 % de la production nationale et 95% de la production d'électricité d'origine hydraulique. Les bonnes performances de la classe EnR4 sont en particulier liées au déploiement des EnR dans le transport et le chauffage alors que celles de la classe EnR5 résultent de l'importance de la filière hydraulique sur des territoires constitués de régions montagneuses.

Afin de mieux comprendre les mécanismes du développement territorial des EnR, nous avons considéré un large éventail de variables regroupées en six thèmes : l'environnement, la démographie, le développement économique, la spécialisation sectorielle, le climat et la géographie et enfin la politique.

Nous avons montré que les processus à l'œuvre à l'échelle régionale diffèrent de ceux qui prévalent au niveau national. En particulier, le poids des partis écologistes ainsi que l'importance des émissions de GES ne se traduisent pas par un développement soutenu des nouvelles filières d'EnR. Par ailleurs, bien que les résultats confirment l'hypothèse selon laquelle des disparités régionales en termes de spécialisation sectorielle et de performance économique induisent des mix énergétiques différenciés ainsi qu'un développement contrasté des EnR, il s'avère qu'à l'échelle régionale, le déploiement des EnR ne semble pas plus dynamique dans les régions à forte croissance économique. La classe EnR1, composée de l'Ile de France, bien que présentant des performances économiques supérieures à celles de l'ensemble de la France métropolitaine est peu impliquée dans le développement des EnR. Ces résultats peuvent s'expliquer par une plus faible hétérogénéité des performances économiques et environnementales à l'échelle des régions que des pays. Les choix en termes de politiques énergétiques et environnementales sont arrêtés au niveau national avant d'être déclinés au niveau régional. Enfin, l'urbanisation et la forte densité de la population en Ile de France restreignent le développement de grands parcs éoliens et photovoltaïques et entravent le développement des EnR.

Certaines variables géographiques conditionnent fortement le déploiement territorial des EnR : l'hydraulique s'est développé dans les régions montagneuses alors que le nucléaire a été favorisé dans les régions bénéficiant de ressources en eau importantes. En revanche, nous observons que les variables climatiques et en particulier la vitesse moyenne du vent, la température, l'ensoleillement ne constituent pas des facteurs déterminants du développement de l'éolien et/ou du photovoltaïque, ces filières énergétiques se développent de manière

indifférenciée sur tout le territoire français. Nous constatons une défaillance dans la valorisation du potentiel énergétique des territoires. Cela résulte des dispositifs de soutien au développement des EnR électriques dont bénéficient largement les filières éolienne et photovoltaïque et qui se traduisent par des subventions d'exploitation au travers d'obligations d'achat et de mécanismes de compensation. Ces subventions ont amené des distorsions de concurrence entre les filières énergétiques et se révèlent économiquement peu efficaces. Ce constat a été établi par la Cour des comptes (2018) qui pointe des dérives du soutien public aux EnR. En particulier, les EnR électriques bénéficient de l'essentiel des dépenses publiques, « les EnR thermiques reçoivent aujourd'hui l'équivalent d'un dixième du volume de soutien public consacré aux EnR alors qu'elles représentent 60 % de la production nationale, hors transports ». Les soutiens octroyés par l'État sont également disproportionnés par rapport à la contribution de certaines filières aux objectifs de développement des EnR, en particulier deux tiers des efforts sont consacrés au photovoltaïque dont la production représente seulement 0,7 % du mix électrique. La France figure parmi les pays d'Europe les plus en retard dans le déploiement des EnR.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier les facteurs qui contribuent au développement des EnR à l'échelle des régions, ils seront utiles pour construire un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la consommation des EnR (au niveau agrégé, régional et par filières). Néanmoins, pour mieux appréhender les efforts régionaux en termes de promotion des EnR, il nous semble opportun d'adopter une approche dynamique. Nous nous proposons dans une future recherche d'utiliser des méthodes d'analyse des données temporelles, permettant de prendre compte la dimension temporelle. Nous étudierons le développement des EnR sur la période 1990-2015. La dimension temporelle est cruciale en matière d'énergie en raison de l'existence de délais importants entre la décision d'investir dans des équipements, la mise en place de ces équipements et la production d'énergie.



## **Chapitre 2 : Trajectoires du développement régional des EnR dans les régions françaises**

### **Introduction**

La notion de transition énergétique tend à s'imposer au cœur des agendas politique et scientifique. En effet, la France s'est dotée en 2015 d'une « stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable » et d'une loi relative à « la transition énergétique pour la croissance verte ». À l'échelle internationale, cette orientation s'est déjà confirmée dans les années 90 avec la souscription à des engagements environnementaux dans le cadre du protocole de Kyoto et à d'autres plus récents, notamment le paquet Énergie-Climat de l'Union européenne en 2008.

À l'échelle nationale, l'État français s'organise pour répondre aux engagements souscrits dans le cadre international et européen (Chevalier et Dir, 2009). Le défi est double : assurer le « 3 fois 20 » à un horizon 2020 et le « facteur 4 » à une échéance plus lointaine, 2050. Le « 3 fois 20 » exige, en France, d'atteindre 23 % d'énergies renouvelables dans le bouquet énergétique national, de gagner 20 % en efficacité énergétique par rapport à 1990 et, enfin, de réduire de 17 % les émissions de gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique. Le « facteur 4 » renvoie à l'objectif de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 par rapport à 1990.

La politique énergétique est une politique historiquement centralisée, du fait du caractère national de la production électrique française. Par conséquent, la réflexion sur la région, et plus généralement sur le rôle des collectivités territoriales, finit par devenir un quasi tabou car étant systématiquement interprétée comme une contestation de l'État central ou de la nationalisation (Poupeau, 1999). Or, l'apparition des énergies de sources renouvelables dans le mix électrique français bouleverse ce schéma, la décentralisation de l'organisation de ces énergies constitue en fait une nécessité pour leur développement. Ainsi les collectivités territoriales ont progressivement gagné en compétences dans ce domaine. En effet, durant les années 1980 et surtout 1990, la pénétration croissante des thèses écologistes dans la société et dans le monde politique à travers la participation des verts à certains gouvernements, l'attention portée par l'État aux économies d'énergie et au développement des sources de production renouvelables ont renforcé le rôle des régions dans la politique énergétique.

Le contexte actuel sur les questions énergétiques a rendu urgente cette territorialisation de la politique de l'énergie. Le législateur, dans le cadre de la décentralisation, a privilégié une gouvernance locale avec un niveau opérationnel de planification situé à l'échelle des régions qui sont légitimes à porter leur vision et leurs ambitions dans le débat énergétique. En effet, dès 1998, les régions ont initié diverses politiques dans le champ du développement durable. Ces collectivités étaient déjà impliquées (avec l'ADEME) dans les économies d'énergie et/ou des réseaux de distribution d'énergie. Mais c'est en 2007, qu'elles se sont vues confier de véritables compétences, en particulier en matière de planification (Schéma régional du climat de l'air et de l'énergie, Schéma régional éolien, Plan climat énergie territorial, Schéma régional de cohérence écologique, etc.).

Si la transition énergétique est au cœur des préoccupations environnementales et de la planification des politiques énergétiques locales et nationales, il apparaît indispensable d'en comprendre les origines historiques et d'adopter une analyse dynamique permettant de révéler les mécanismes temporels de cette transition. L'adoption d'une approche temporelle dans l'étude du processus de la transition énergétique permet de mieux comprendre la conflictualité de la mise en politique actuelle de cette transition (Labussière et Nadaï, 2016). En effet, pour mieux appréhender les efforts régionaux en termes de promotion des EnR, nous adoptons une approche dynamique. Nous nous proposons d'effectuer une analyse temporelle réalisée sur des données agrégées (moyennes sur chaque sous-période) permettant de prendre en compte la dimension temporelle. Nous étudions le développement régional des EnR sur la période 1990-2015. La dimension temporelle est cruciale en matière d'énergie en raison de l'existence de délais importants entre la décision d'investir dans des équipements, la mise en place de ces équipements et la production d'énergie.

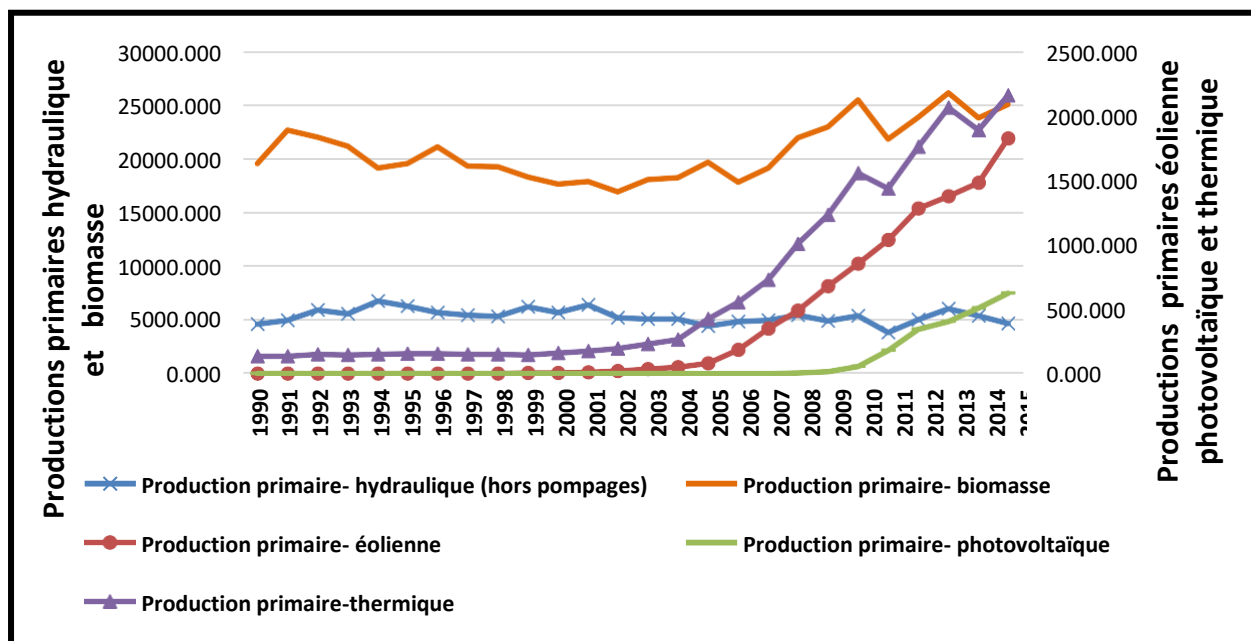
## **Section 1: Présentation des données**

### **1.1 Evolution des variables actives sur la période 1990-2015**

Notre objectif est d'analyser la dynamique du développement des EnR sur la période 1990-2015, et d'établir une typologie des régions françaises (métropolitaines et DOM) en termes de diversification du bouquet énergétique relativement aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie). Les spécificités régionales sont appréhendées à partir des variables actives décrites dans le Tableau 6 du chapitre 1.

La figure 12 présente des productions primaires d'EnR par filière, tout usage confondu (électricité, chaleur et transport), sur la période 1990-2015.

**Figure 12** : Evolution des productions primaires d'EnR par filière (données agrégées pour la France en Ktep)



Source : Service de l'observation et des statistiques du Commissariat Général au Développement Durable

Hormis la production hydraulique qui semble relativement stable tout au long de la période 1990-2015, les productions primaires des autres filières ont fortement augmenté. En effet, mature et techniquement au point, l'énergie hydraulique s'est fortement développée en France bien avant les années 1990. Ainsi, sa production a faiblement augmenté au cours de la période d'analyse. L'énergie biomasse, quant à elle, a augmenté de 28% pour l'ensemble de la période 1990-2015. Cette hausse est essentiellement tirée par une forte croissance de la filière bois-énergie, surtout dans le domaine de la chaleur. Enfin, les filières thermique et éolienne ont connu une forte croissance à partir de 2004, leurs taux de croissance sur la période 2004-2015 sont respectivement de 721 % (263,04 Ktep en 2004, 2160,4 Ktep en 2015) et 3472% (54,14 Ktep en 2004, 1827,04 Ktep en 2015). La période 2010-2015 est marquée par une forte émergence de la filière et photovoltaïque (+1071%; de 53,31 Ktep en 2010 à 624,41Ktep en 2015).

Dans ce qui suit, nous adoptons une double approche à la fois temporelle et spatiale afin de mettre en évidence les éventuelles disparités temporelles et spatiales du développement des EnR en France. Nous présenterons en premier lieu, les statistiques descriptives de l'ensemble des variables actives, calculées sur la période 1990-2015 et pour l'ensemble des régions. Dans cette même logique, nous présenterons également une analyse temporelle sur des données spatialement agrégées, il s'agit de l'évolution moyenne annuelle des variables actives pour l'ensemble des régions. En second lieu, nous adopterons une approche spatiale sur des données temporellement agrégées, permettant de mettre en évidence des disparités régionales en termes de développement des EnR sur la période 1990-2015.

Afin d'étudier la dimension temporelle du développement des EnR, nous considérons les moyennes annuelles des variables calculées sur l'ensemble des régions. Les statistiques sommaires sont reportées dans le tableau 9.

**Tableau 9:** Statistiques temporelles sommaires

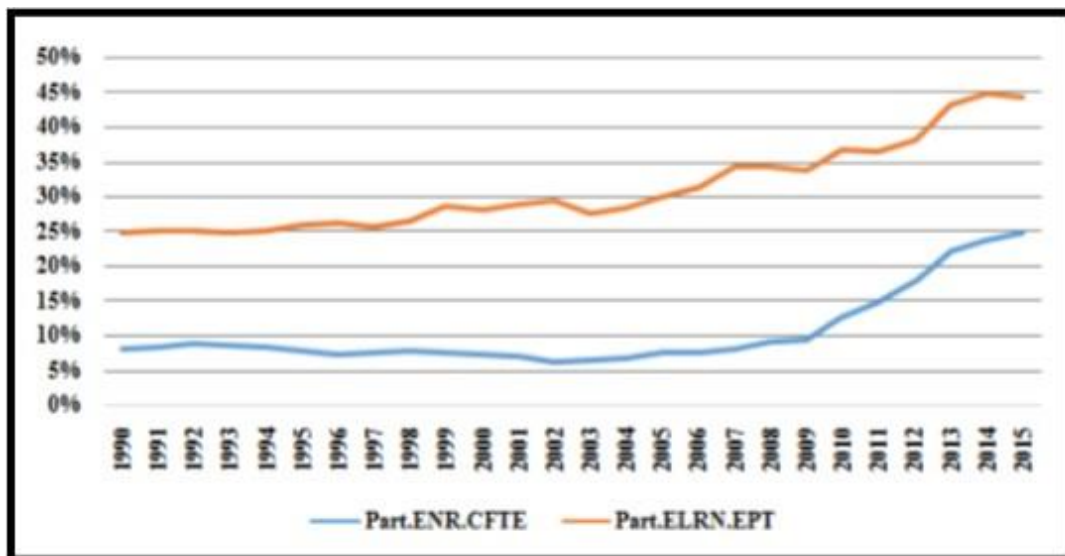
	<b>Moyenne</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Coefficient de Variation</b>
<b>Part.ENR.CFTE</b>	11%	6%	25%	6%	52%
<b>Part.ELRN.EPT</b>	31%	25%	45%	6%	20%
<b>Part.Hydr.PELRN</b>	57%	36%	71%	13%	22%
<b>Part.eol.PENR</b>	11%	0%	33%	13%	118%
<b>part.phot.PELRN</b>	5%	0%	10%	3%	62%
<b>part.therm.PELRN</b>	13%	10%	14%	1%	11%
<b>part.biom.PELRN</b>	14%	10%	16%	2%	15%
<b>Cons. CH.RN Ktep /hab</b>	1,80E-04	1,34E-04	2,22E-04	2,30E-05	13%
<b>Cons.BiocKtep/hab</b>	3,02E-05	8,43E-06	5,90E-05	1,48E-05	49%
<b>CCF.Ktep/hab</b>	1,75E-03	1,24E-03	2,01E-03	1,94E-04	11%
<b>PELRN.Gwh/hab</b>	1,48E-03	1,20E-03	1,96E-03	1,69E-04	11%
<b>PTEM.Gwh/hab</b>	9,03E-03	7,53E-03	1,39E-02	1,16E-03	13%
<b>PEN.Gwh/hab</b>	6,83E-03	6,52E-04	1,20E-02	1,73E-03	25%
<b>IE</b>	9,96E-02	8,51E-02	1,13E-01	8,61E-03	9%

L'analyse des moyennes et des indicateurs de dispersion relatifs aux variables actives révèle de fortes disparités temporelles. La part moyenne des EnR dans la consommation finale d'énergie atteint 11 % pour l'ensemble de la période 1990-2015, elle varie de 6% en 2002 à 25 % en 2015. Si l'on considère le coefficient de variation qui permet de comparer le niveau

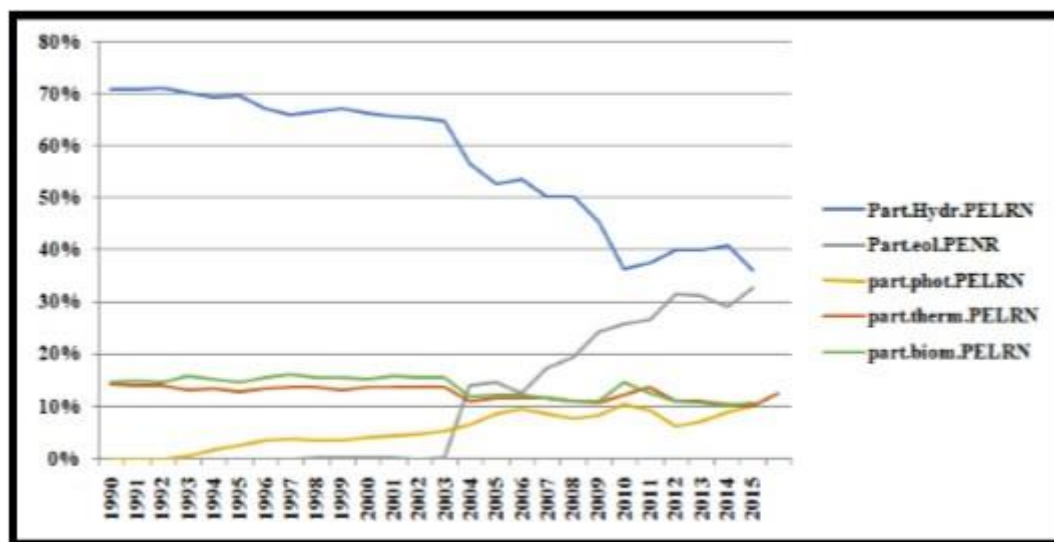
d'homogénéité ou de dispersion relative des données autour de la moyenne, il varie de 85% pour la part de l'électricité éolienne dans la production totale de l'électricité renouvelable à par habitant à 914 % pour la part relative à l'électricité thermique. Nous notons un coefficient de variation très élevé pour la part des EnR dans la consommation finale d'énergie (52%), ainsi que pour les parts de l'éolien (118%) et du photovoltaïque (62%) dans la production totale d'électricité renouvelable. Cela témoigne d'une grande variabilité temporelle des parts des EnR en France au cours de la période 1990-2015.

La figure 13 présente l'évolution des parts des EnR dans la production totale d'électricité et dans la consommation totale d'énergie, tandis que la figure 14 présente l'évolution des parts des filières d'EnR dans la production totale (moyennes régionales annuelles).

**Figure 13** : Évolution des parts d'EnR dans la production totale d'électricité et dans la consommation totale d'énergie (moyennes régionales annuelles)



**Figure 14 :** Évolution des parts des filières d'EnR dans la production totale (moyennes régionales annuelles)



Les évolutions des parts des EnR dans la consommation finale d'énergie et dans la production totale de l'électricité primaire sont marquées par une forte croissance sur la période 1990-2015, soit respectivement 201% et 79%. Il est à noter que sur la période, à l'exception de la filière hydraulique, les parts moyennes des différentes filières d'énergie renouvelable dans la production totale de l'énergie renouvelable ont fortement augmenté. L'hydraulique qui bénéficie d'une technologie considérée comme mature offre un potentiel déjà largement exploité en France, n'évolue quasiment plus à l'échelle nationale sur la période ; sa part dans la production d'électricité décroît fortement depuis 2003 avec l'émergence des nouvelles filières d'EnR.

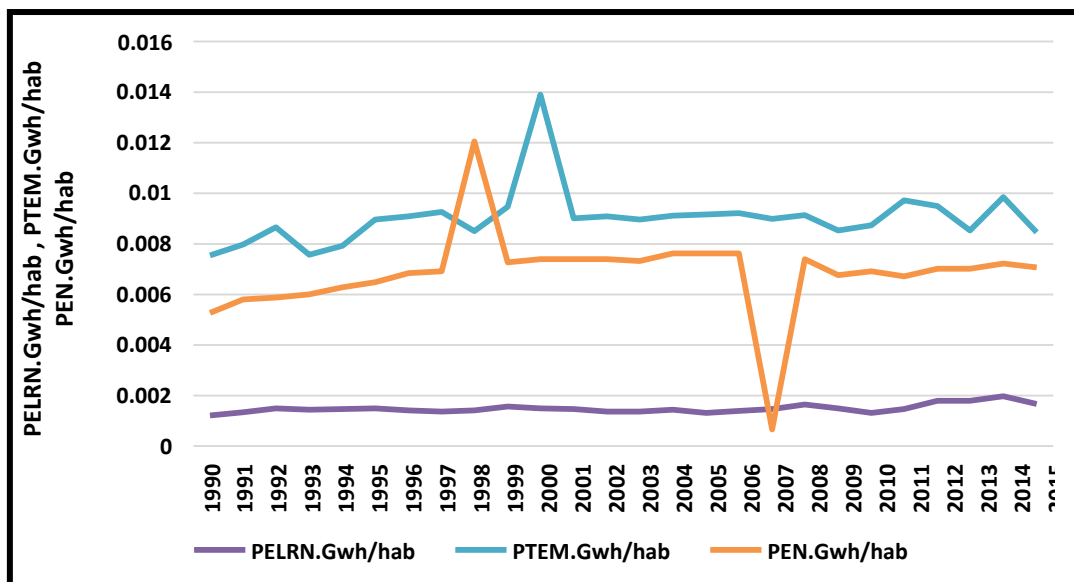
L'essentiel de la croissance des nouvelles filières EnR provient du développement du parc éolien et solaire photovoltaïque. L'essor exponentiel entre 2003 et 2015 de la filière éolienne est particulièrement marqué à partir de l'année 2005, année de référence de la Directive (UE) 2015/1513<sup>33</sup>. L'électricité d'origine renouvelable a bénéficié à cet effet d'une nouvelle dynamique grâce aux incitations des pouvoirs publics. Pour ces filières, comme pour l'hydraulique, les disparités temporelles des capacités sont très marquées. Cependant, les parts

<sup>33</sup>Directive (UE) 2015/1513 du Parlement européen et du Conseil du 9 septembre 2015 modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables.

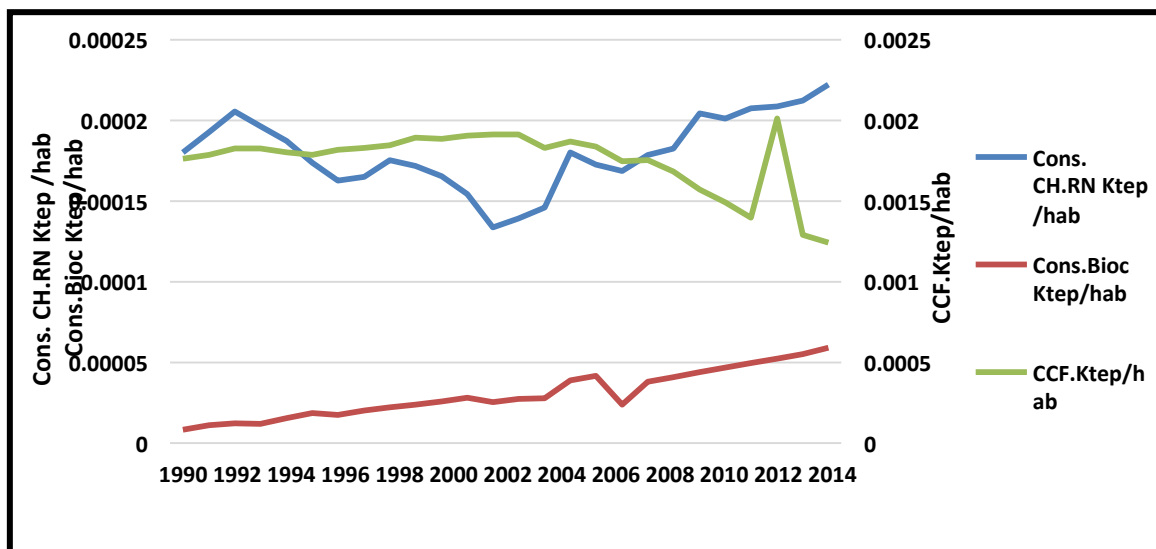
des deux filières biomasse et thermique dans la production de l'électricité sont restées en stagnation sur notre période d'étude. En effet, de 1990 à 2003, on assiste à une légère régression de l'usage de la biomasse (du bois et des déchets urbains) à des fins de chauffage et non d'électricité et à une stagnation du solaire thermique. Les évolutions des parts de la biomasse et du thermique dans la production de l'électricité renouvelable sont restées proches des moyennes, soit respectivement 14 et 13% sur la période 1990-2015.

Les figures 15 et 16 présentent respectivement les évolutions des productions et des consommations d'énergie par habitant sur la période 1990-2015.

**Figure 15** : Évolution des productions de l'électricité totale, l'électricité renouvelable et l'électricité nucléaire par habitant (moyennes régionales annuelles)



**Figure 16:** Évolution des consommations de la chaleur renouvelable, des biocarburants et des combustibles fossiles par habitant (moyennes régionales annuelles)



Les disparités temporelles sont très marquées. En effet, la production de l'électricité renouvelable est largement inférieure à celle du nucléaire dont dépend en grande partie la production totale de l'électricité primaire. Cette dépendance vis-à-vis du nucléaire est clairement représentée par les deux courbes d'évolution de la production de l'électricité nucléaire et l'électricité totale (figure 15). En contrepartie, on assiste à une diminution la consommation des combustibles fossiles par habitant, soit une baisse de 29% (figure 16). La consommation de chaleur renouvelable est en hausse de 23 % par rapport à 1990. Le développement de la filière des biocarburants est spectaculaire et régulier sur la période, la consommation par habitant a augmenté de 600% au cours de la période 1990-2015.

## 1.2 Disparités régionales en termes de développement des EnR sur la période 1990-2015

Dans ce qui suit, nous adopterons une approche spatiale sur des données temporellement agrégées, permettant de mettre en évidence des disparités régionales en termes de développement des EnR sur la période 1990-2015. Nous considérons les moyennes régionales des variables calculées à partir des vingt-six années considérées dans notre échantillon.



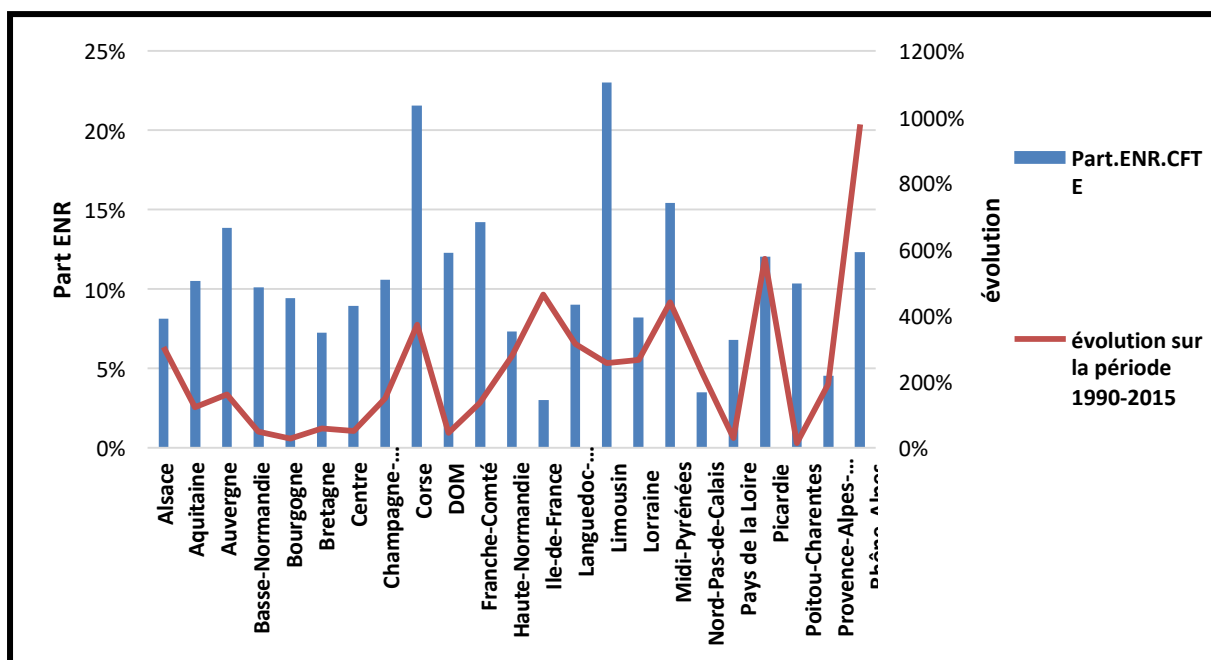
Les figures ci-après illustrent parfaitement ces différences régionales en termes de consommation d'EnR. Nous commençons par la présentation des statistiques régionales sommaires.

**Tableau 10** : Statistiques régionales sommaires

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	Coefficient de Variation
<b>Part.ENR.CFTE</b>	11 %	1%	60%	9%	83%
<b>Part.ELRN.EPT</b>	31% %	0%	99%	30%	97%
<b>Part.Hydr.PELRN</b>	57%	0%	100%	36%	63%
<b>Part.eol.PENR</b>	11%	0%	87%	20%	187%
<b>part.phot.PELRN</b>	5% %	0%	54%	8%	146%
<b>part.therm.PELRN</b>	13%	0%	54%	15%	118%
<b>part.biom.PELRN</b>	14%	0%	60%	15%	112%
<b>PTEM.Gwh/hab</b>	9,03E-03	1,00E-04	1,20E-01	1,01E-02	112%
<b>PELRN.Gwh/hab</b>	1,49E-03	0	0,0066	1,60E-03	108%
<b>PEN.Gwh/hab</b>	6,83E-03	0	1,21E-01	1,05E-02	154%
<b>CCF.hab.Ktep/hab</b>	1,75E-03	8,00E-04	3,20E-03	4,14E-04	24%
<b>Cons. CH.RN Ktep /hab</b>	1,80E-04	1,00E-05	6,50E-04	1,07E-04	59%
<b>Cons.BiocKtep/hab</b>	3,02E-05	0	1,41E-04	2,15E-05	71%
<b>IE (tep/1000 €)</b>	9,97E-02	3,20E-02	1,77E-01	2,38E-02	24%

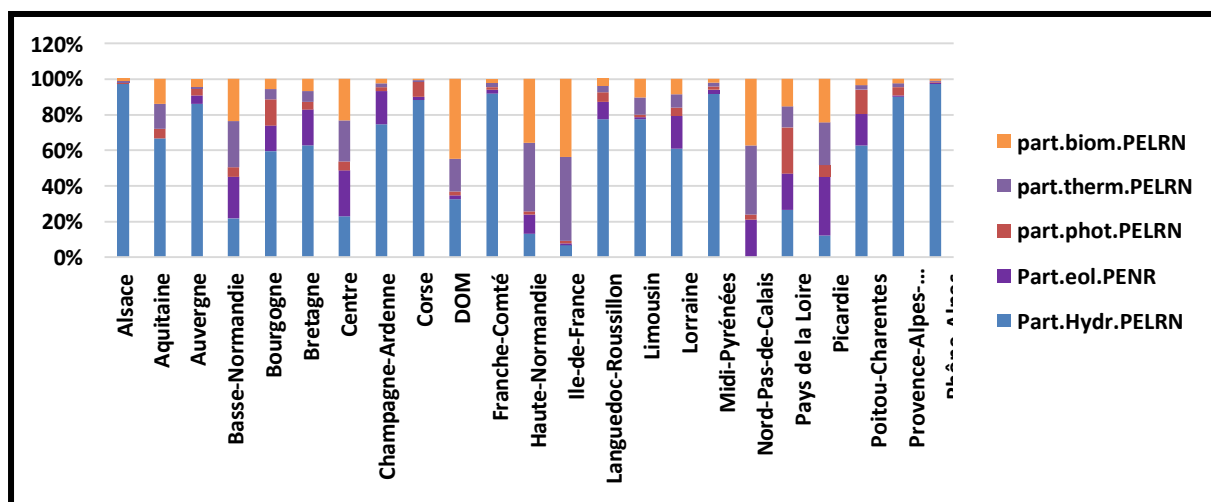
L'analyse des moyennes et des indicateurs de dispersion relatifs aux variables actives révèle de fortes disparités entre les régions. La part moyenne des EnR dans la consommation finale d'énergie atteint 11% pour l'ensemble de la période 1990-2015, elle varie de 1% dans la région Ile-de-France en 1998 à 60% pour le Limousin en 2015. Si l'on considère le coefficient de variation qui permet de comparer le niveau d'homogénéité ou de dispersion relative des données autour de la moyenne, il varie de 24% pour l'intensité énergétique et la consommation des combustibles fossiles par habitant à 187% pour la part de l'éolien dans la production totale d'électricité renouvelable. Nous notons également un coefficient de variation très élevé pour la part des EnR dans la consommation finale d'énergie (83%) ainsi que pour les parts de la biomasse (112%), de l'éolien (187%), du photovoltaïque (146%) et du thermique (118%) dans la production totale d'électricité renouvelable, ce qui témoigne d'un développement régional des EnR très contrasté.

**Figure 17:** Parts d'EnR dans la consommation finale d'énergie par région (moyenne de 1990 à 2015)



**Note :** La variable « évolution sur la période 1990-2015 » représente le taux de croissance sur la période 1990-2015 de la part consommée des EnR dans la consommation finale d'énergie pour chaque région.

**Figure 18 :** Répartition de la production d'électricité renouvelable par source d'énergie (moyenne de 1990 à 2015)



La figure 18 met en évidence des spécificités régionales fortes sur la période 1990-2015. Chaque région possède un potentiel différent de production d'énergie renouvelable qui doit

permettre à la France d'atteindre l'objectif de 23 % d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie en 2020. Pour y parvenir, le développement de la production d'électricité renouvelable est au cœur de la stratégie française. Depuis quelques années, les différentes mesures de soutien ont induit une évolution majeure tant sur la quantité produite que sur sa répartition. En effet, de nouvelles filières se sont développées, telles que l'énergie éolienne et plus récemment le solaire photovoltaïque.

Les régions Limousin, Corse, Auvergne, Rhône-Alpes, Franche-Comté et Midi-Pyrénées présentent les meilleurs résultats en termes de parts des EnR dans la consommation finale (Figure 17). Ces régions possèdent, comme le montre la figure 18, un fort potentiel de production d'électricité hydraulique (électricité de barrage). Cette ressource abondante leur permet ainsi de produire une très grande quantité d'électricité renouvelable et ainsi de couvrir une large part de leur consommation finale.

Les régions Champagne-Ardenne, Basse-Normandie, Picardie, Lorraine et Centre, se démarquent surtout par la grande quantité de "nouvelles" sources d'énergies renouvelables installées. En effet, la production d'électricité renouvelable de ces régions provient essentiellement de la filière éolienne, technologie dans laquelle, ces territoires sont particulièrement impliqués.

L'électricité photovoltaïque est non seulement développée dans le sud-est de la France (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, Aquitaine et Corse), mais aussi au niveau des régions, Bourgogne, Poitou-Charentes et Pays de la Loire qui disposent de grands espaces propices à l'installation des équipements de panneaux solaires

Enfin, certaines régions, notamment l'Île-de-France, les DOM et la Haute-Normandie sont fortement spécialisées dans la production d'électricité d'origine biomasse et thermique. Ces deux énergies renouvelables participent fortement à l'alimentation du réseau de chaleur dans ces trois régions.

En guise de conclusion, la double approche temporelle et spatiale que nous avons adoptée a permis de mettre en évidence des disparités temporelles et spatiales du développement des EnR en France. L'analyse temporelle sur des données spatialement agrégées dévoile une grande variabilité temporelle des parts des EnR en France au cours de la période 1990-2015. En effet, hormis la production hydraulique, les productions primaires des autres filières ont fortement augmenté depuis 2003. Quant à l'approche spatiale sur des données

temporellement agrégées, elle a mis en évidence des disparités territoriales et un développement régional des EnR très contrasté sur la période 1990-2015 reflétant pour chaque région des potentiels différents de production d'EnR.

## **Section 2: Méthodologie et résultats empiriques**

Dans le but d'étudier l'engagement des régions dans la transition énergétique et leur performance en termes de développement des EnR, nous utilisons des méthodes d'analyse multidimensionnelles. Il s'agit dans un premier temps d'analyser la dynamique des régions françaises en termes de déploiement des EnR sur la période 1990-2015 dans le but d'identifier des sous-périodes de développement des EnR. Dans un second temps, nous élaborons une typologie du développement des EnR en France pour chaque sous-période afin de mettre en évidence les similitudes et les dissemblances entre régions en termes de diversification du bouquet énergétique relativement aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie).

### **2.1 Méthodologie**

L'approche adoptée repose sur une combinaison de méthodes d'analyses de données temporelles multidimensionnelles prenant en compte les caractéristiques énergétiques des régions et leur évolution sur la période 1999-2015. Les analyses habituelles sur données annuelles ne permettent pas une analyse globale puisqu'elles sont effectuées séparément (année par année), elles ne prennent pas en compte la possibilité de l'existence d'une structure commune dans le temps. L'évolution des classes de régions pour chaque sous-période est donc étudiée à partir d'une analyse temporelle réalisée sur des données agrégées (moyennes sur chaque sous-période)

Cette analyse permet d'étudier les individus, à savoir les régions caractérisées par un même groupe de variables mesurées chaque année. Cette analyse souligne la structure commune d'un ensemble de groupes de variables observées pour les mêmes individus (22 régions métropolitaines (les DOM étant considérés comme individu illustratif)). Le premier intérêt de cette méthode est d'effectuer une analyse factorielle dans laquelle l'influence des différents groupes de variables est équilibrée *a priori*. Cet équilibre est nécessaire car les groupes de variables diffèrent toujours en fonction de la structure des variables, notamment de leurs interrelations. Elle fournit des représentations de régions et de variables pouvant être interprétées selon une analyse usuelle en composantes principales (ACP). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a ensuite été utilisée sur les facteurs significatifs de l'ACP

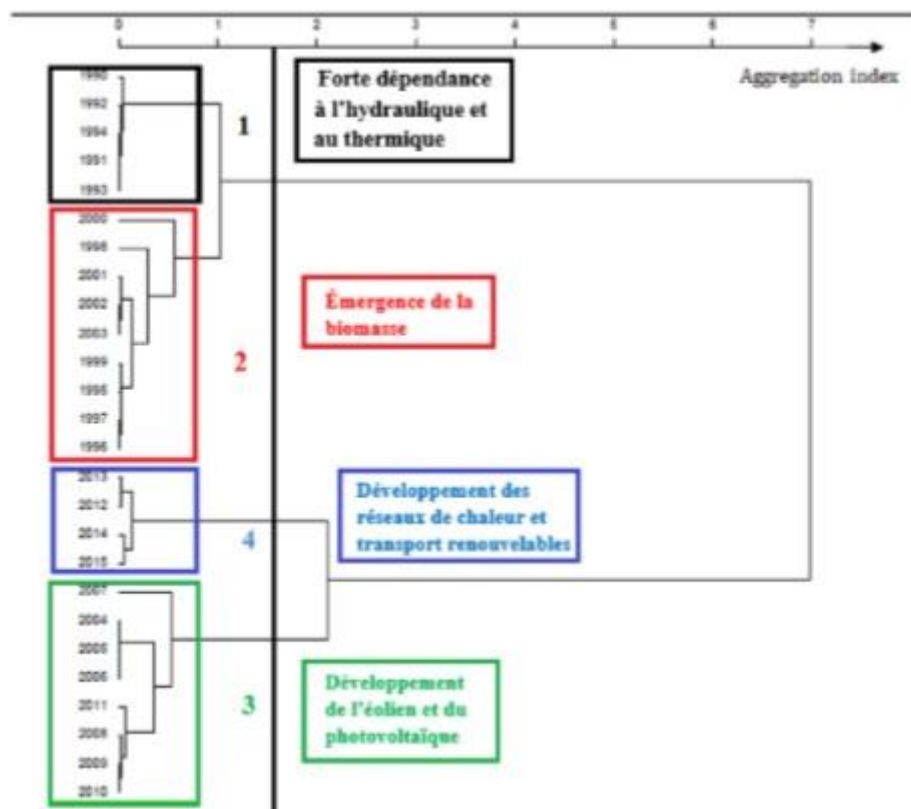
afin de caractériser les classes de régions relativement à l'évolution des variables actives.

Nous commençons dans un premier temps par l'identification des sous-périodes du développement des EnR.

## **2.2 Dynamique du développement des EnR sur la période 1990-2015**

Pour analyser la dynamique du développement des EnR sur la période 1990-2015, nous étudions l'évolution moyenne annuelle des variables énergétiques (les 14 variables actives) pour l'ensemble des régions françaises (métropolitaines et DOM). Dans cette analyse, les années jouent le rôle des «individus» et les valeurs annuelles moyennes le rôle des variables. Une analyse par grappe a été appliquée pour regrouper les années de la période 1990-2015 en classes homogènes ou sous-périodes. Plus précisément, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée pour les facteurs significatifs de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des moyennes annuelles des variables. La variabilité temporelle des variables actives constatée dans la section précédente permet de justifier l'utilisation de l'ACP normée sur les années. Cette combinaison méthodologique des méthodes factorielles et de classification constitue un instrument pour l'observation statistique et l'analyse structurelle des données. Le dendrogramme de la figure 19 représente l'arbre hiérarchique des années. Le tableau 11 résume les principaux résultats caractérisant la partition choisie en quatre sous-périodes, obtenues à partir de l'arbre hiérarchique de la figure 19.

**Figure 19:** Arbre hiérarchique des années selon le développement des EnR sur la période 1990-2015



**Tableau 11:** Partition synthétique en quatre sous-périodes

	<b>Classe 1</b> (Forte dépendance à l'hydraulique et au thermique)	<b>Classe 2</b> (Émergence de la biomasse)	<b>Classe 3</b> (Développement de l'éolien et du photovoltaïque)	<b>Classe 5</b> (Développement des réseaux de chaleur et transport renouvelables)
<b>Durée</b>	5 ans	9 ans	8 ans	4 ans
<b>Années</b>	1990 à 1994	1995 à 2003	2004 à 2011	2012 à 2015
<b>Profils (+)</b>	+Part.Hydr.PELRN +Part.therm.PELRN	+Part.biom.PELRN +Part.Hydr.PELRN +Part.therm.PELRN +CCF.hab	+Part.phot.PELRN +Part.eol.PENR	+Part.ENR.CFTE +PELRN.Gwh.hab +Part.ELRN.EPT +Part.eol.PENR +Cons.Bioc.Ktep.hab +Cons..CH.RN.Ktep.hab
<b>Anti-Profils (-)</b>	-Part.eol.PENR -Part.phot.PELRN -Part.ELRN.EPT -Cons.Bioc.Ktep.hab	-Part.ELRN.EPT -Part.ENR.CFTE -Part.eol.PENR -Cons.CH.RN.Ktep.hab	-Part.therm.PELRN -Part.Hydr.PELRN -Part.biom.PELRN	-CCF.hab -Part.therm.PELRN -Part.Hydr.PELRN -Part.biom.PELRN

Note: Pour chaque sous-période, les variables sont significatives au seuil de 5%.

La classification établie met en évidence quatre sous-périodes de développement des ENR. La première s'étale sur quatre ans (1990-1994) et se caractérise par une forte dépendance aux énergies hydraulique et thermique. Ces deux énergies sont parmi les énergies renouvelables les plus matures pour produire de l'électricité. En effet, le développement de la filière hydraulique en France remonte aux années de l'après-guerre mondiale (entre 1946 et 1960) lorsque s'est posée la question de l'indépendance en termes d'approvisionnement en matières premières, notamment le charbon qui apparaissait alors comme peu stratégique, le développement de l'hydraulique est alors privilégié (Debay, 2017). Consécutivement à ce plan, l'électricité est à 60% produite par des centrales hydrauliques entre 1946 et 1960. Cette première sous-période se caractérise également par l'inexistence des nouvelles filières d'EnR, notamment l'éolien et le photovoltaïque dont le développement n'a pris de l'ampleur que dans les années 2000, la part des EnR dans la production de l'électricité demeure par conséquent relativement faible aux cours de cette période, l'essentiel de cette production était assuré par la filière nucléaire<sup>34</sup>. En effet, 74% de la production nette d'électricité de la période était assuré par la filière nucléaire contre seulement 15% de production issue des EnR. Le développement de cette filière a été initié par le général De Gaulle dans les années 50-60. Le premier programme nucléaire civil français débute véritablement lors du troisième plan quinquennal (1957-1961). La crise pétrolière de 1973 a accéléré les engagements. L'impact de ce choc a conduit le gouvernement Messmer à engager un programme de construction électronucléaire afin d'assurer l'indépendance énergétique du pays (Røren, 2013). Les moyens financiers et humains étaient alors mobilisés dans ce sens au détriment du développement des énergies renouvelables, à l'exception de l'énergie hydraulique développée très tôt. Enfin, nous notons que cette première sous-période est marquée par une sous-consommation des biocarburants avec la baisse du prix de pétrole après le contre-choc pétrolier de 1986 qui continuait d'attirer les consommateurs ainsi que les industriels au détriment des biocarburants.

Au cours de la seconde période (1995 - 2003), le bouquet énergétique est encore peu diversifié, il dépend fortement des combustibles fossiles, de l'hydraulique et du thermique. Cependant, nous observons l'émergence de la biomasse dont la part moyenne est passé de 15,3% à la première sous-période à 37,4% à la seconde période. En effet, la biomasse, utilisée

---

<sup>34</sup>Le nucléaire ne ressort dans les profils ou les anti-profils sur aucune sous-période, la production moyenne de l'électricité nucléaire a été relativement stable sur chaque sous-période et fluctue autour de 0,0067 Gwh/hab

comme biocombustible pour produire de la chaleur et de l'électricité, a connu un fort développement au cours des années 90. A l'échelle internationale, cette période est marquée par l'adoption du protocole de Kyoto. En effet, en 1997 la convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a été adoptée traduisant l'engagement des parties prenantes (ratifiant le protocole) à diminuer leur niveau d'émission de gaz à effet de serre. L'Union Européenne a eu un rôle prépondérant dans le domaine : elle a ratifié le Protocole de Kyoto de 2002 et a pris l'engagement ambitieux de réduire ses émissions de GES de 8% en 2012 par rapport au niveau 1990. Dans ce cadre, la France s'est orientée vers l'utilisation accrue des sources d'énergie renouvelable, notamment de la biomasse. La valorisation énergétique de la biomasse au cours de cette période a été marquée par l'exploitation de la bagasse, résidu de la canne à sucre, par les centrales thermiques (Bilionière, 2011). Cette période se caractérise également par une faible consommation des énergies renouvelables que ce soit pour produire de l'électricité (faible part de l'éolien dans la production de l'électricité renouvelable) ou de la chaleur (faible consommation de la chaleur renouvelable). En effet, les combustibles fossiles continuent de dominer le paysage énergétique grâce notamment à une relative stabilité des prix de pétrole durant cette période.

La troisième période s'étend de 2004 à 2011 et se distingue par le développement des deux nouvelles filières d'ENR, à savoir les énergies éolienne et photovoltaïque. La France s'est engagée en 2005 dans une politique volontariste de promotion des EnR visant à la diversification du bouquet énergétique renouvelable. Par conséquent, à côté de l'hydraulique, la biomasse et le thermique, la production d'énergie d'origine éolienne et photovoltaïque s'est insérée dans le mix énergétique. Quasi inexistantes dans le mix de capacité électrique en 2000, aussi bien au niveau français qu'europpéen, ces deux technologies ont pu trouver leur place, à côté de l'hydraulique, dans la génération d'électricité. Cette période est marquée par l'adoption de lois favorisant le recours aux EnR. En effet, la Loi 13 juillet 2005<sup>35</sup>, dite loi POPE est la première à chiffrer des objectifs de promotion des énergies renouvelables. Cette loi repose sur la transposition en droit interne des directives européennes. Dans ce cadre, l'Etat doit veiller à la cohérence de son action avec celle des collectivités territoriales et de l'Union européenne. La Loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement a fixé à l'horizon 2020 un objectif de 23 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en concertation avec les objectifs européens, donnant ainsi une nouvelle impulsion politique forte à la promotion des EnR. Les

<sup>35</sup>Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de politique énergétique.



objectifs fixés dans le cadre de cette loi ont été ensuite mis en œuvre et déclinés par la voie réglementaire dans le cadre d'une programmation pluriannuelle des investissements pour la chaleur et l'électricité (PPI). En plus de ces lois favorisant le recours aux nouvelles filières renouvelables électriques, la filière de l'éolien offshore a exclusivement été soutenue via un premier appel d'offre lancé en 2005. En contrepartie, les moyennes des parts des filières classiques, hydraulique, biomasse et thermique dans la production de l'électricité renouvelable sont significativement inférieures à celles de la période globale.

Au cours de la dernière sous-période (2012 à 2015), on assiste à la montée en puissance des nouvelles filières d'EnR, notamment l'éolien et les biocarburants. Outre la production d'électricité, les réseaux de chaleur et de transport renouvelables sont en plein essor. Concernant l'électricité, le développement de la filière éolienne se fait à un taux de croissance supérieur à celui des autres filières renouvelables (hydraulique, biomasse et thermique). Les parts des EnR dans la production de l'électricité totale et dans la consommation totale d'énergie, ainsi que la production de l'électricité renouvelable par habitant se situent à des niveaux supérieurs par rapport à la moyenne sur la période globale. Quant à l'essor du réseau de transport renouvelable, il a été surtout favorisé par la hausse du prix du baril de pétrole, les biocarburants deviennent de plus en plus intéressants économiquement au cours de cette dernière période. La production de la chaleur renouvelable s'est également développée bénéficiant du soutien du fonds chaleur qui, selon le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), devait ainsi atteindre 420 millions d'euros 2017 pour ainsi atteindre l'objectif de plus de 50 % de la chaleur renouvelable en 2023 (par rapport à 2014). Ces objectifs sont inscrits dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Nous notons qu'au cours de cette dernière période, toutes les régions françaises ont adopté les Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) dont le principal engagement est le développement des EnR. Ce schéma est en parfaite adéquation avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) adoptée en 2015 fixant un objectif ambitieux de 32% EnR dans la consommation finale brute d'énergie à l'horizon 2030.

En guise de conclusion, la méthode de classification adoptée nous a permis de relever quatre sous-périodes de développement des EnR. La première s'étale sur quatre ans (1990-1994) et se caractérise par une forte dépendance aux énergies hydraulique et thermique. Au cours de la seconde période (1995 - 2003), le bouquet énergétique est encore peu diversifié se basant sur les combustibles fossiles, les énergies hydraulique et thermique avec l'émergence de l'énergie biomasse. La troisième période s'étend de 2004 à 2011 et se distingue par le

développement des deux nouvelles filières d'ENR, à savoir les énergies éolienne et photovoltaïque. Et finalement, sur la dernière sous-période (2012 à 2015), on assiste à la diversification des EnR. A côté de la production d'électricité, les réseaux de chaleur et de transport renouvelables sont en plein essor. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'analyse des trajectoires des régions en termes de développement des EnR en identifiant des classes de régions dont le profil énergétique est similaire pour chaque sous-période.

### **2.3 Trajectoires moyennes du développement régional des EnR sur la période 1990-2015**

Ayant mis en évidence quatre phases dans le déploiement des EnR en France sur la période 1990-2015, nous nous intéressons aux trajectoires régionales de ce développement. Pour ce faire, nous construisons une typologie des régions françaises relativement aux 14 variables considérées sur chacune des sous-périodes.

Nous présentons les résultats de la classification ascendante hiérarchique (HAC) (voir Annexe (figures A4, A5, A6 et A7) qui a été utilisée sur les facteurs significatifs de l'analyse en composantes principales (ACP) afin de caractériser les classes de régions relativement à l'évolution des variables actives.

**Tableau 12:** Trajectoires moyennes du développement régional des EnR dans les régions françaises sur les quatre sous-périodes

		Période 1990 à 1994		Période 1995 à 2003		Période 2004 à 2011		Période 2012 à 2015
Classe 1	+Part.ENR.C FTE	Auvergne	+Part.ENR.C FTE	Auvergne	+Part.ENR.C FTE		+part.therm	IDF
	+Cons.CH.R N	Corse	+Cons.CH.R N	Corse	+Cons.CH.R N	Corse	+part.biom	
Classe 2	+Cons.Bioc	Bourgogne	+Cons.Bioc	F-Comté		Limousin	-IE	
	+Part.ELRN. EPT	F-Comté	+Part.ELRN. EPT	Limousin			-Cons.Bioc	
Classe 3	-CCF.hab	Limousin						
	+PELRN.hab +Part.Hydr	Alsace Aquitaine Bretagne	+PELRN.hab +Part.ELRN. EPT	Alsace Bretagne	+Part.Hydr.P ELRN	Alsace Aquitaine	+PEN.hab	C-Ardenne
Classe 4	-Part.biom	M-Pyr L-Rous PACA R-Alpes	+Part.eol	M-Pyr	+PELRN.hab	Auvergne Bretagne	+PTEM.hab	Centre
			+Part.Hydr	L-Rous PACA R-Alpes	-Part.biom	F-Comté M-Pyr	+IE	B-Norm
Classe 5			-Part.biom	R-Alpes	-Part.therm.	L-Rous PACA R-Alpes	+Part.eol	H-Norm
					-Part.eol		Part.ELRN.EP T	Lorraine
Classe 6							-Part.Hydr	NPDC
	+IE	Lorraine P-Char	+IE	Aquitaine Bourgogne	+Part.eol	Bourgogne	+Part.phot	Bourgogne
Classe 7	+CCF.hab		+CCF.hab	Lorraine P-Char	+Cons.Biocha b	PDLL Picardie		PDLL Picardie P-Char
					Part.Hydr.PE LRN	P-Char		
Classe 8								
	+Part.phot		+Part.phot		+PEN.hab	C-Ardenne	+Part.ELRN.E PT	Auvergne Bretagne
Classe 9	+Part.biom		+Part.biom		+PTEM.hab	Centre		F-Comté
	-Part.Hydr	IDF Picardie PDLL	-Part.Hydr	IDF Picardie PDLL	+CCF.hab	H-Norm	-PEN.hab	L-Rous
Classe 10					+IE	Lorraine B-Norm	-PTEM.hab	
					-	NPDC		P-Char
Classe 11					Part.ELRN.E PT			
	+Part.therm.	C-Ardenne Centre	+Part.therm.	C-Ardenne Centre			+PELRN.hab	Alsace Aquitaine
Classe 12	+PEN.hab		+PEN.hab		+Part.therm		+Part.ENR.CF TE	Corse
	+Part.biom	B-Norm	+Part.biom	B-Norm	+Part.biom	IDF	+Part.Hydr	Limousin
Classe 13	+PTEM.hab		+PTEM.hab				+Cons.CH.RN	M-Pyr
	-	H-Norm	-	H-Norm	-IE		-Part.eol	PACA R-Alpes
Classe 14	Part.ELRN.E PT		Part.ELRN.E PT		-Cons.Bioc			
	-Part.Hydr	NPDC	-Part.Hydr	NPDC				

Le tableau 12 résume les résultats des partitions des régions en cinq classes homogènes sur les quatre sous-périodes et fournit la caractérisation des classes. L'évolution temporelle du développement des EnR dans les régions françaises a identifié quatre sous-périodes homogènes avec des profils distincts. Nous notons que les analyses temporelles des régions françaises montrent une certaine stabilité des trajectoires moyennes des régions. En effet, les quatre typologies présentent cinq classes homogènes avec des profils et anti-profils presque identiques à l'exception de l'Auvergne, l'Aquitaine, la Bourgogne, la Franche-Comté, Poitou-Charentes, et la Lorraine qui ont suivi des voies différentes en termes de développement des EnR, le reste des régions ont suivi un parcours presque identique sur la période 1990-2015.

La première classe comprend 4 régions sur l'ensemble de la période, à savoir l'Alsace, Aquitaine, Midi-Pyrénées, PACA et Rhône-Alpes. Cette classe est composée également du Limousin et de la Corse à la dernière sous-période, tandis que la Bretagne et le Languedoc-Roussillon en font partie dans les trois premières sous-périodes. Elle se distingue par une part élevée de l'électricité hydraulique et des parts faibles des énergies biomasse et thermique dans l'électricité totale renouvelable. Ces régions se sont fixées un objectif ambitieux en matière de développement des EnR bien au-delà de 20% d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie, objectif moyen à atteindre à l'horizon 2020 dans le cadre le cadre du Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE). Les régions du Limousin et de Midi-Pyrénées sont particulièrement impliquées avec des objectifs respectifs de 55% et 38%. Cette orientation « historique » vers l'hydraulique se traduit par une part élevée de l'électricité renouvelable dans l'électricité totale et par une production électrique renouvelable par habitant significativement supérieure à la moyenne des autres classes. Par conséquent, ces régions affichent des faibles niveaux de production de l'électricité nucléaire et de consommation des combustibles fossiles sur la première et les deux dernières sous-périodes.

La deuxième classe rassemble les régions Ile-de-France, la Picardie et Pays de la Loire sur les deux premières sous-périodes et puis de la région Ile-de-France sur les troisième et quatrième sous-périodes. La caractérisation de cette classe est plus ou moins stable sur les quatre sous-périodes. En effet, cette classe se distingue par un leadership pour les deux filières biomasse et thermique sur la période 1990-2015. Dans ce cadre, une attention particulière a été accordée aux filières bois énergie et biocombustibles solides dans le cadre du SRCAE de la région Ile-de-France qui a défini des objectifs ciblés en termes de développement de la biomasse de combustion. L'énergie hydraulique apparaît peu développée dans ces régions, par

contre les autres filières, notamment la valorisation de la biomasse et des déchets ainsi que le solaire thermique sont en plein essor. On note également que la région Ile de France affiche une forte spécificité sectorielle traduite par une faible intensité énergétique sur la période 2004-2015, il s'agit d'une région peu industrialisée et plus orientée vers les services. En effet, l'Ile de France affiche une forte spécificité sectorielle avec une tertiarisation marquée de l'économie.

La troisième classe est constituée de cinq régions qui en constituent le noyau, sur les quatre sous-périodes à savoir la Basse-Normandie, le Centre, la Haute-Normandie et Nord-Pas-de-Calais et la Champagne-Ardenne. La région Lorraine est également rattachée à cette classe au cours des troisième et quatrième sous-périodes. La caractérisation de cette classe est stable sur l'ensemble de la période. En effet, les productions de l'électricité nucléaire et primaire par habitant sont nettement supérieures aux moyennes respectives des régions constituant les autres classes. Par conséquent, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables est peu développée, notamment à cause d'un potentiel de développement limité pour l'hydraulique. Cependant, on note qu'à partir de 2004, ce sont ces régions qui fournissent le plus d'efforts dans le développement des nouvelles filières, notamment éolienne.

Les trajectoires moyennes des régions peuvent être considérées comme relativement stables, seules six régions ont changé de classe entre 1990 et 2015. La Bourgogne est passée de la classe 1, caractérisée par une production renouvelable élevée sur la période 1990-1994, à la classe 3, caractérisée par une forte consommation des combustibles sur la période 1995-2003. Ce changement de classe correspond à une similitude entre son profil et celui de la classe 3. Il peut être également expliqué par l'émergence de la filière solaire photovoltaïque qui a pris son essor dans la région dans la seconde moitié des années 2000. Quant à l'Auvergne et la Franche-Comté, elles ont changé leurs classes d'appartenance aux deux dernières sous-périodes. Elles se distinguent néanmoins par une part élevée de l'électricité renouvelable dans l'électricité totale tout au long des quatre sous-périodes. L'Aquitaine a quitté la classe qui se distingue par une forte production hydraulique pour rejoindre la troisième classe sur la période 1995-2003. La région retrouve sa position dans la classe 2 et la classe 5 étant parmi les régions leaders dans la production électrique hydraulique. Enfin, la Lorraine se positionne toujours dans des classes caractérisées par une forte intensité énergétique et un développement considérable des filières fossiles et nucléaires. À la dernière sous-période, la région est particulièrement impliquée dans le développement de la filière éolienne.

Enfin, nous montrons que la trajectoire du développement des EnR est bien engagée sur la période 2004-2015 puisque nous assistons à la montée en puissance des nouvelles filières d'EnR. Par ailleurs, l'implication des régions dans le développement des nouvelles filières d'énergies renouvelables semble d'autant plus forte que les régions ne bénéficient pas d'avantages historiques liés à la présence de la filière hydraulique. Certaines régions se sont limitées uniquement au développement de la filière hydraulique, nous notons que cette énergie est plutôt concentrée au niveau de la Corse, Midi-Pyrénées, Alsace et Rhône-Alpes tout au long des sous-périodes identifiées, grâce notamment aux aménités territoriales favorisant ce type d'énergie (Montagne et cours d'eau). Tandis que d'autres régions ont consenti davantage d'efforts pour le développement des nouvelles filières, notamment l'éolien et le photovoltaïque.

La production des deux filières électriques renouvelables (éolienne et photovoltaïque) est en plein essor, elle a fortement augmenté à partir de 2004. Son développement récent atténue légèrement l'écart entre régions pour ce qui est de la part de l'électricité renouvelable dans la production totale d'électricité (qui varie de 0,78% % en Île-de-France à 82% en Franche-Comté pour toute la période). Ces deux filières connaissent une dynamique particulière depuis 2005 grâce aux incitations mises en place par les pouvoirs publics (subventions et avantages fiscaux). C'est la forte montée en puissance entre 2004 et 2015 de ces nouvelles énergies, de l'éolien notamment, qui commence à modifier le mix électrique de certaines régions. Ainsi en est-il de la Bourgogne, de la Lorraine, du Centre et de la Picardie. La dynamique engendrée par ces nouvelles énergies est toutefois assez différente d'une région à l'autre ; certaines d'entre elles (Alsace, Corse, Limousin...) sont même restées à l'écart de tout développement des nouvelles filières sur la période considérée.

## Conclusion

Les régions françaises témoignent d'une intégration hybride de la question énergétique dans les politiques publiques. L'évolution de leur rapport à l'énergie se situe à la fois en situation de filiation avec les expériences européennes et se place dans le sillage d'une incitation nationale à la transition.

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la dimension environnementale de la dynamique des régions françaises en étudiant le développement régional des EnR sur la période 1990-2015. Afin d'approcher les potentialités des territoires en matière de promotion des EnR, nous avons procédé à des typologies de l'ensemble des régions en utilisant des variables relatives aux consommations et productions énergétiques. Il s'agit de poser un autre regard sur la transition énergétique et l'adaptation au changement climatique à l'échelle régionale. Ces typologies visent à définir des profils de comportements des régions, à partir de l'analyse combinée des variables énergétiques.

La classification établie met en évidence quatre sous-périodes de développement des ENR. La première s'étale sur quatre ans (1990-1994) et se caractérise par une forte dépendance aux énergies hydraulique et thermique. Au cours de la seconde période (1995 - 2003), le bouquet énergétique est encore peu diversifié se basant sur les combustibles fossiles, les énergies hydraulique et thermique avec l'émergence de l'énergie biomasse. La troisième période s'étend de 2004 à 2011 et se distingue par le développement des deux nouvelles filières d'ENR, à savoir les énergies éolienne et photovoltaïque. Et finalement, sur la dernière sous période (2012 à 2015), on assiste à la diversification des ENR. En effet, à côté de la production d'électricité, les réseaux de chaleur et de transport renouvelables sont en plein essor au cours de cette dernière période.

Dans un second temps, nous avons identifié cinq types distincts de profils de développement des EnR sur les quatre sous-périodes afin de mettre en évidence les similitudes et les dissemblances entre régions en termes de diversification du bouquet énergétique relativement aux bilans énergétiques des régions. Nous avons mis en évidence une certaine stabilité dans les trajectoires des régions à l'exception des régions de l'Auvergne, l'Aquitaine, la Bourgogne, la Franche-Comté, Poitou-Charentes, et de la Lorraine qui ont connu des trajectoires plus contrastées en termes de développement des EnR. Les 16 autres régions ont suivi un parcours similaire sur la période 1990-2015. Cette structure très stable

révèle que les disparités entre les régions au début des années 1990 ont persisté tout au long de la période. Les régions où la situation initiale était favorable en termes de part consommée des EnR ont renforcé cette situation, tandis que d'autres n'ont pas réussi à combler leur retard, à l'exception de la Picardie et des Pays de la Loire. Ces deux régions sont parvenues à diversifier leurs bouquets énergétiques renouvelables. Ceci est dû en grande partie au développement de la filière éolienne dans les deux régions. En effet, Pays de la Loire dispose d'un potentiel éolien réel qui se traduit dans le schéma régional éolien de la région par un objectif ambitieux de puissance installée (600 MW) à l'horizon 2020, alors que la Région Picardie dont la nature est favorable au développement de l'éolien accompagne le développement des éco-activités et structure la filière de l'éolien en lien avec un tissu industriel mobilisé.

A noter que malgré des voies différentes, les performances des régions françaises dans le développement des énergies renouvelables sont conformes à la politique nationale, puisqu'en 2015, 48% des régions ont déjà dépassé l'objectif de 20% des EnR dans la consommation finale d'énergie à atteindre dans le cadre du SRCAE. Ces efforts inégalement répartis devraient cependant permettre à la France d'atteindre l'objectif fixé à 23 % par la loi de transition énergétique pour la croissance verte pour 2020 puisque les ENR représentaient déjà 15,2 % de la consommation finale d'énergie en 2015. Pour atteindre les objectifs 2030, il serait souhaitable que les efforts soient équitablement répartis entre les régions et que des objectifs spécifiques soient définis pour les nouvelles filières d'ENR. Dans la mesure où le potentiel hydroélectrique de la France est déjà bien exploité, les énergies renouvelables prometteuses sont entre autres le bois énergie, la géothermie, les biocarburants, le biogaz, la valorisation énergétique des déchets, ainsi que l'éolien et le solaire photovoltaïque. Parmi ces énergies électriques, l'éolien terrestre, puis plus récemment, le solaire photovoltaïque sont les énergies vertes les plus compétitives. Même si la part de ces nouvelles filières reste encore limitée, leur essor, bien qu'encore assez récent, a considérablement modifié l'offre énergétique des régions. Les autres énergies doivent gagner encore plus en compétitivité surtout dans les domaines de la chaleur et l'électricité. En effet, La Cour des comptes (2018) a souligné déséquilibre du soutien financier qui bénéficie essentiellement aux énergies renouvelables électriques, au détriment de leurs homologues thermiques.



Ces résultats ont permis de suivre l'évolution régionale des EnR sur la période 1990-2015. Nous nous proposons dans le chapitre suivant de construire un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la consommation d'énergie renouvelable afin d'identifier les facteurs du développement des énergies renouvelables à l'échelle des régions.

## **Chapitre 3 : Les déterminants de la consommation régionale des énergies renouvelables en France**

### **Introduction**

Dans le cadre des efforts fournis pour lutter contre le changement climatique, les EnR deviennent une source d'énergie de plus en plus importante dans la mesure où les coûts économiques et sociaux causés par les sources d'énergie traditionnelles ont conduit à s'interroger sur la durabilité de ces ressources. Toutefois, la majeure partie de la demande d'énergie est généralement satisfaite par l'importation de combustibles fossiles, soit près de 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017. Néanmoins, cette demande pose plusieurs problèmes, notamment, i) l'augmentation des coûts de l'énergie ; ii) la croissance démographique ; iii) une augmentation de la consommation énergétique par personne ; iv) les problèmes environnementaux. Par conséquent, il apparaît important de limiter l'utilisation des énergies fossiles et d'offrir une opportunité pour l'expansion du secteur des EnR (Zawaydeh, 2015 ; Sadorsky, 2009).

Selon le rapport mondial 2017 sur les énergies renouvelables (REN21, 2017), la capacité renouvelable installée dans le monde en 2016 a dépassé les nouvelles installations conventionnelles (fossiles et nucléaires), pour la première fois dans l'ère industrielle. Par exemple, en Chine, la production d'énergie éolienne augmente plus que la production à partir du charbon et dépasse la production d'énergie nucléaire (REN21, 2013). L'énergie renouvelable consolide rapidement le rôle qu'elle joue dans l'approvisionnement énergétique dans le monde, c'est dans les pays émergents que l'AIE prévoit que la croissance de ces énergies, sera la plus forte. Ainsi, à elle seule, la Chine devrait installer près de 1 300 GW d'EnR d'ici à 2025, soit 33 % des nouvelles capacités mondiales. Enfin, l'investissement dans la technologie renouvelable devrait presque doubler en 2030 (de 270 milliards de dollars en 2014 à 400 milliards de dollars en 2030), ces investissements mondiaux dans les énergies renouvelables s'élevaient à 39 milliards de dollars en 2004 (AIE, 2015).

Au niveau européen, les EnR offrent aux États la possibilité de développer un secteur énergétique compétitif, fiable et durable, de contribuer à résoudre les problèmes énergétiques les plus urgents et les défis auxquels la communauté est confrontée, en particulier, la réduction de la dépendance énergétique des pays à l'égard des importations de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel (Andoura et Vinois, 2015). Par ailleurs,

l'Union Européenne s'est assignée un objectif très ambitieux en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'ici 2030, elle vise à les réduire de 40 % par rapport au niveau Enregistré en 1990. Pour y parvenir, elle s'est fixée en octobre 2014, des objectifs clés pour ce plan ambitieux. D'ici 2030, plus de 27% de sa production d'électricité devra provenir de sources d'EnR, alors que les EnR ne représentaient environ que 10 % de la production d'électricité de l'Union européenne en 2015.

Au niveau national, les EnR sont la quatrième source d'énergie en France après le nucléaire, les produits pétroliers et le gaz, le pays a pour objectif d'atteindre 32 % d'EnR dans sa consommation brute d'ici 2030. Pour remplir cet objectif ambitieux et diversifier le mix énergétique du pays, le gouvernement français a fixé différents objectifs à atteindre pour chaque région, notamment dans le cadre des Schémas régionaux climat air énergie (SRCAE).

Les investissements dans les EnR s'accroissent dans de nombreuses économies, notamment, développées. Le potentiel énergétique important les disponibilités élevées aux niveaux national et local convertissent l'énergie renouvelable en une option importante qui présente de nombreux avantages pour les États et les régions (Iancu et al., 2013). Toutefois, de nombreux facteurs influent sur l'utilisation de ces nouvelles sources d'énergie. Au niveau national, les principaux déterminants sont : les prix de l'énergie, la production d'énergie, la dépendance énergétique, la croissance économique, l'ouverture commerciale et le volume des émissions de gaz à effet de serre. En outre, les niveaux de développement des pays ont une influence significative sur le degré d'interaction entre ces facteurs (Lévy et al., 2014).

A l'échelle régionale, l'étude des déterminants de cette consommation est un champ de recherche récent. Les EnR sont réparties sur toute la France, mais, comme nous l'avons constaté dans les chapitres précédents, les différentes régions ne sont pas à égalité dans la course au développement des EnR. En effet, suite aux différences en termes de potentiel, certaines régions ont été précurseurs et se positionnent en leader du développement des EnR. Se limiter à la comparaison des consommations ou des productions d'énergie entre les régions n'est pas pertinent pour évaluer leurs performances respectives. En effet, les disparités observées traduisent des spécificités structurelles du tissu économique, des ressources naturelles, des spécificités des structures productives, ou encore des différences de climat (Buchner et Galeotti, 2003). Ainsi, la compréhension des déterminants des différences de consommation ou de production, est un facteur clé pour réussir l'activation des leviers de la politique énergétique au niveau local.

Les différences de population et de densité contribuent également à expliquer les disparités de consommation des EnR d'une région à l'autre (Zeng et al., 1998, Birdsall et al., 2001, O'Neill et Chen., 2002). De même, la disponibilité des ressources fossiles ou naturelles et le potentiel productif énergétique ont une incidence sur le niveau de production. Il est donc intéressant d'analyser ces indicateurs et d'en comprendre les déterminants pour définir dans quelle mesure chaque région peut contribuer à l'atteinte des objectifs environnementaux.

Il apparaît alors essentiel de prêter davantage attention aux dynamiques territoriales pour mieux appréhender les éléments favorisant cette consommation. En effet, au-delà des aménités géographiques et climatiques, certaines variables économiques, environnementales, démographiques ou politiques peuvent expliquer le développement des EnR sur un territoire donné.

Dans le cadre de l'étude des déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale, ce chapitre ambitionne de contribuer à la littérature sur les déterminants de la consommation des EnR (Sadorsky (2009), Tiwari (2011), BenJebli et Ben Youssef (2013),...). Nous construisons un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la part des EnR dans la consommation finale d'énergie au niveau régional sur la période 1990-2015. Notre échantillon est constitué des 22 régions métropolitaines et des DOM. Notre analyse tient compte de l'hétérogénéité des régions en effectuant des tests de causalité de Granger du modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM) et des tests de causalité en panel (Dumitrescu et Hurlin (2012)). Nous proposons également une analyse d'intégration-cointégration sur panel, en utilisant les méthodes des moindres carrés complètement modifiés (FMOLS) et des moindres carrés dynamiques (DOLS) pour estimer les effets de long terme.

Ce chapitre se décline en trois parties. Nous commencerons dans une première section par une revue de la littérature. Une deuxième section sera consacrée à la présentation des données et de la méthodologie. La dernière section sera réservée à la présentation du modèle retenu, à l'interprétation des résultats empiriques et aux recommandations politiques qui en découlent.

## **Section 1 : Revue de littérature**

La littérature empirique sur les déterminants des EnR est relativement nouvelle (BenJabli et Ben Youssef (2013), Apergis et Payne (2010), Apergis et Danuletiu (2014),...). Elle s'est largement concentrée sur la relation entre la croissance économique, la consommation d'énergie nucléaire, la consommation des EnR et les émissions de CO<sub>2</sub>. Les travaux portant sur l'étude de ce lien causal se multiplient constituant un important champ de recherche. Cependant, la plupart des études se sont focalisées sur des comparaisons entre pays; les travaux portant sur les régions sont plus limités ou presque inexistantes. L'objet de ce chapitre est justement de remédier à ce manque en proposant une contribution portant sur les régions françaises. Nous commençons par exposer les principaux travaux qui se sont intéressés à l'étude de la relation entre la croissance économique, la consommation d'énergie nucléaire, la consommation des EnR et les émissions de CO<sub>2</sub>.

**Tableau 13:** Résumé des études empiriques sur les liens entre la consommation d'énergie nucléaire, les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation d'énergie renouvelable et la croissance économique.

Auteurs	Pays	Période	Méthodologie	Résultats
<a href="#">Yoo et Jung (2005)</a>	Corée	1977-2002	Racines unitaires Cointégration en panel Causalité de Granger et modèle à correction d'erreur vectorielle (MCEV)	CEN -> PIB
<a href="#">Menyah et Rufael (2010)</a>	EU	1960-2007	Causalité de Granger et MCEV	CEN -> CO <sub>2</sub>
<a href="#">Tugcu (2013)</a>	Turquie	1970-2011	Analyses de causalité de Granger de Dolado et Lütkepohl	CEN <-> CER
<a href="#">Ocal et Aslan (2013)</a>	Turquie	1990-2010	Approche ARDL	CER a un impact négatif sur le PIB
<a href="#">Tiwari (2011)</a>	Inde	1960-2009	Approche structurelle VAR	Un choc positif sur la consommation des EnR augmente le PIB et diminue les émissions de CO <sub>2</sub>
<a href="#">Pao et Fu (2013)</a>	Brésil	1980-2010	Causalité de Granger et MCEV	CERNH -> PIB, PIB <-> CER, PIB -> CENR
<b>Études sur plusieurs pays</b>				
<a href="#">Sadorsky (2009a)</a>	Pays G7	1985-2007	Cointégration en panel	l'augmentation du PIB réel par habitant et des émissions de CO <sub>2</sub> par habitant a un impact positif sur la CER
<a href="#">Yoo et Ku (2009)</a>	Six pays	1986-2005	Racines unitaires Cointégration en panel Causalité de Granger et MCEV	CEN <-> PIB (Suisse) PIB <-> CEN (France et Pakistan)
<a href="#">Apergis et Payne (2010)</a>	Six pays	1980-2005	Pedroni (1999, 2004)	CEN<-> PIB (court terme) CEN -> PIB (long terme)
<a href="#">Apergis et al. (2010)</a>	19 pays développés et en développement	1984-2007	Causalité de Granger et MCEV	CO <sub>2</sub> <-> CEN

<b>Lee et Chiu (2011)</b>	Pays développés	1971-2006	Panel Cointégration en panel Causalité de Granger et MCEV	PIB -> CEN (long terme) CEN ≠ PIB (court terme )
<b>Bildirici (2013)</b>	10 pays émergents de l'Amérique latine	1980 - 2009	ARDL  Causalité de Granger et MCEV	BE <-> PIB
<b>Apergis et Payne (2010b)</b>	13 pays en Eurasie	1992 - 2007	Panel Cointégration en panel	CER <-> PIB
<b>Apergis et Danuletiu (2014)</b>	80 pays	1990-2012	Test de causalité à long terme de Canning et Pedroni (2008)	CER-> PIB
<b>Ben Jebli et Ben Youssef (2013)</b>	5 pays de l'Afrique du nord	1971-2008	Cointégration en panel  FMOLS/DOLS	PIB ->CO <sub>2</sub> , CD ≠ PIB (Court-terme)  CO <sub>2</sub> -> CER, CD-> PIB (Long-terme)
<b>Ben Jebli et al. (2014)</b>	24 pays de l'Afrique subsaharienne	1980-2010	CEK  Panel Cointégration en panel causalité au sens de granger	CO <sub>2</sub> <-> PIB (Court-terme)  CO <sub>2</sub> -> CER PIB <-> CER
<b>Chang et al. (2014)</b>	Six pays développés	1971-2011	causalité au sens de granger	PIB-> CEN (pays de G6) CEN <-> PIB (RU)
<b>Naser (2015)</b>	4 pays industrialisés (EU, Canada, Japon, France)	1965-2010	Approche ARDL	CEN -> PIB (Japon)  PIB -> CEN (France)  PIB ≠ CEN (EU, Canada)

Note : CEN: représente la consommation d'énergie nucléaire ; PIB : le PIB réel ; CO<sub>2</sub> : les émissions de dioxyde de carbone ; CER : la consommation d'énergie renouvelable ; CD : la consommation des déchets; CERNH : la consommation des EnR non hydroélectriques; CENR : la consommation des énergies non renouvelables et CEK : La courbe environnementale de Kuznets.

-> : causalité unidirectionnelle ; <-> : causalité bidirectionnelle et ≠ : Absence de causalité

La plupart de ces études confirment l'existence d'une relation entre la croissance économique et la consommation des EnR d'une part, et entre cette dernière et les émissions de CO<sub>2</sub>. L'augmentation du PIB réel par habitant et des émissions de CO<sub>2</sub> par habitant semblent être les principaux moteurs de la consommation d'énergie renouvelable qui à son tour, a un impact positif sur la croissance économique.

Apergis et Payne (2010b), Pao et Fu (2013) et Ben Jebli et al. (2014) montrent l'existence d'une causalité bidirectionnelle entre la consommation des EnR et le PIB réel par habitant, alors que pour Apergis et Danuletiu (2014), cette relation est unidirectionnelle allant de la consommation des EnR au PIB réel par habitant. Ces résultats suggèrent que le développement des EnR est favorable à la croissance économique et que les politiques de développement des EnR ne peuvent pas retarder la croissance économique. Les résultats confirment également que la croissance économique est cruciale pour fournir les ressources nécessaires au développement durable. Nous supposons qu'à l'échelle régionale, la croissance économique peut également entraîner une augmentation de la consommation des EnR.

Par ailleurs, d'autres résultats Menyah et Rufael (2010), Apergis et al. (2010) établissent que la consommation d'énergie nucléaire à court terme joue un rôle important dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, alors que Ben Jebli et Ben Youssef (2013) et Ben Jebli et al. (2014) ont montré l'existence d'une causalité unidirectionnelle allant des émissions de CO<sub>2</sub> à la consommation des EnR. Dans ce cadre, Tiwari (2011) confirme qu'un choc positif sur la consommation des EnR diminue les émissions de CO<sub>2</sub>. Les résultats du reste des études révèlent que la consommation des EnR ne contribue pas à la réduction des émissions. Cela peut s'expliquer par l'absence d'une technologie de stockage adéquate pour surmonter les problèmes d'intermittence liés à l'utilisation des nouvelles filières, ce qui oblige les producteurs d'électricité à recourir à des sources d'énergie génératrices d'émissions pour répondre à la demande.

Panayotou (1993) et Stern (2004) ont mis l'accent sur l'impact de la structure économique sur la consommation d'énergie (toutes sources confondues). En effet, une forte spécialisation sectorielle mesurée par un degré d'industrialisation élevé explique des niveaux de consommation d'énergie contrastés entre les pays. En effet, étant polluante et très énergivore, la production industrielle a été aussi mise en avant, dans de nombreuses études, comme un facteur déterminant de la consommation énergétique. Dans cette perspective, Wang et al. (2011) ont montré que l'industrialisation accroît les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie en Chine. À l'échelle régionale, nous estimons que les régions très industrialisées



auront tendance à consommer plus d'énergie d'origine fossile ou nucléaire que d'origine renouvelable.

Les facteurs démographiques constituent aussi des éléments déterminants de la consommation des EnR à l'échelle des territoires. Cependant, il n'y a pas de consensus sur l'effet de l'urbanisation sur le développement des EnR. L'urbanisation peut dégrader la qualité de l'environnement. Une urbanisation rapide et non maîtrisée augmente la consommation des ressources naturelles, génère de la pollution, ce qui peut favoriser le recours aux EnR. Salim et Shafiei (2014) ont analysé l'impact de l'urbanisation sur la consommation des EnR et non renouvelables dans les pays de l'OCDE sur la période 1980-2011. Leurs résultats attestent que l'urbanisation a contribué à la croissance totale de la consommation d'énergie et en particulier à la croissance des consommations d'énergies non renouvelables. Ils ont également mis en évidence une relation significativement négative entre la densité de la population et la consommation d'énergie non renouvelable. En revanche, aucune relation significative n'a pu être établie entre l'urbanisation et l'utilisation des EnR. En revanche, Yang et al. (2016) ont montré que l'urbanisation a un effet positif sur la croissance de la consommation des EnR en Chine. Si la relation entre les variables démographiques et le développement des EnR à l'échelle régionale ne semble pas évidente, on peut cependant conjecturer que les solutions énergétiques dans un territoire urbain ou rural seront différentes. Par exemple, les parcs éoliens et photovoltaïques se développeront en milieu rural.

Cadoret et Padovano (2016), Marques et al (2010), Aklın et Urpelainen (2013) et Dumas et al (2016) introduisent une dimension politique dans l'analyse des déterminants de la consommation des EnR. En effet, Cadoret et Padovano (2016), ont analysé comment les facteurs politiques dans les pays de l'UE 26 affectent le déploiement des sources d'EnR sur la période 2004-2011. Ils ont comparé le pouvoir explicatif des facteurs politiques à celui d'autres facteurs économiques, énergétiques et environnementaux qui ont reçu jusqu'à présent une plus grande attention dans la littérature. Les résultats de l'estimation des données de panel montrent que le lobbying de l'industrie manufacturière retarde le déploiement des EnR, alors que la qualité de la gouvernance a un effet positif; en outre, les partis de gauche encouragent davantage le déploiement des EnR que ceux de droite. Marques et al (2010) soulignent également que le lobby des industries des hydrocarbures constitue un frein au déploiement des EnR. Nous supposons qu'à l'échelle régionale, le poids des partis « verts » peut influencer l'essor des EnR.

Cette dimension politique a été également analysée par Dumas et al (2016), qui ont présenté un modèle dynamique général de la politique de l'énergie renouvelable avec un horizon de long terme. La principale caractéristique du modèle est l'inclusion de l'apprentissage de la technologie et la compétition électorale entre deux partis politiques. Le premier parti avec des préférences " vertes " et l'autre avec des préférences " brunes ", se disputent le pouvoir et choisissent des politiques d'énergie renouvelable. Les résultats suggèrent que les effets les plus importants de l'idéologie partisane sur les politiques se produisent lorsque les parties en conflit sont en désaccord sur l'importance de la politique énergétique. Les auteurs montrent également que la dynamique politique pourrait avoir d'importants effets sur le développement des EnR et les émissions de dioxyde de carbone au fil du temps, influençant la capacité des pays à atténuer le changement climatique.

Dans le même contexte, Aklın et Urpelainen (2013) ont examiné comment les chocs exogènes, tels que les variations des prix internationaux de l'énergie, interagissent avec les facteurs de renforcement positif, tels que la force croissante de la coalition de défense des EnR. La concurrence politique agit sur les politiques de promotion des EnR. Plus précisément, alors que les gouvernements " verts " peuvent utiliser des mécanismes de renforcement positif pour verrouiller les engagements politiques, les gouvernements " bruns " ne favorisent pas le soutien public aux EnR. L'effet du renforcement positif diminue également avec les prix internationaux de l'énergie.

Kilinc-Ata (2015), a également étudié le rôle des instruments de politique de soutien des EnR, notamment, les tarifs de rachat, les quotas, les appels d'offres et les incitations fiscales, dans la promotion du déploiement des EnR dans 27 pays de l'UE et 50 états américains pour la période 1990–2008. Les résultats suggèrent que les politiques d'EnR adoptées jouent un rôle important dans le déploiement des différentes sources d'EnR, mais leur efficacité diffère selon le type d'instruments utilisés. Les résultats révèlent que les tarifs de rachat, les appels d'offres et les incitations fiscales constituent des mécanismes efficaces pour stimuler la capacité de déploiement des sources d'énergie renouvelables pour l'électricité contrairement aux politiques de quotas d'émissions.

## **Section 2 : Données et méthodologie**

### **2.1 Présentation des données et analyse préliminaire**

Dans cette section, nous décrivons les données. Ensuite, nous présentons une brève description des caractéristiques régionales françaises des variables retenues et des propriétés statistiques des séries.

En s'appuyant sur la revue de littérature et sur les résultats de l'analyse factorielle de données réalisée au premier chapitre, nous avons retenu les variables suivantes pour expliquer la part de la consommation d'EnR dans la consommation d'énergie totale :

- Le PIB par habitant en valeur (en monnaie constante) (Pib.val.hab),
- Le taux de croissance du PIB (TC\_Pib),
- Les dépenses en R&D par habitant (en monnaie constante) (D.RD.hab),
- La production industrielle par habitant (en monnaie constante) (PI.hab),
- Les émissions des GES par habitant (EGES.hab),
- La production de l'électricité nucléaire par habitant (PEN.hab),
- La densité de la population régionale (DENS),
- Le taux d'urbanisation (TU), et
- Le score des partis écologistes dans les élections régionales (SPE).

Ces données et leurs sources ont été présentées dans les chapitres précédents. L'échantillon est constitué d'un panel cylindré de 598 observations, relatifs aux 23 régions françaises observées sur la période 1990-2015. Le recours à l'économétrie des données de panel présente un grand avantage. En effet, les données de panel possèdent deux dimensions, temporelle et individuelle favorisant une étude simultanée de la dynamique et de l'hétérogénéité des comportements des régions.

Les statistiques descriptives de l'ensemble des données sont présentées dans le tableau 14, tandis que leurs variances sont reportées dans le tableau 15. Nous remarquons que notre échantillon présente une grande hétérogénéité dans les variables. En particulier, la part des EnR dans la consommation d'énergie finale varie fortement de 1,04% en Ile-de-France, en

1998 à 60,34% dans le Limousin, en 2015. Cette hétérogénéité est également marquée au niveau régional. En effet, en moyenne, le Limousin se trouve en tête de classement des régions en termes de consommation des EnR au cours de la période 1990-2015, alors que l’Ile-de-France se positionne au dernier rang. Le PIB par habitant, dont la moyenne s’établit à 22 806,05 euros, varie aussi fortement entre 9 721 euros dans les DOM et 54 646 euros en IDF.

Pour les autres séries, nous retrouvons la même caractéristique, à savoir une grande diversité des situations parmi les régions de l’échantillon. Par exemple, pour la série dépenses en recherche et développement par habitant, les valeurs varient entre 20euros par habitant en Corse et 1462 euros par habitant dans les Midi-Pyrénées. La série densité de la population présente également une grande variabilité, elle varie de 16 hab/km<sup>2</sup> dans les DOM à 1001 hab/km<sup>2</sup> en Ile-de-France.

**Tableau 14** : Statistiques descriptives

Série	Source	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	N.Obs
Part.ENR.CFTE	DREAL	0,1053	0,0878	0,0104	0,6034	598
Pib.val.hab	INSEE	22806,05	6178,39	9721	54646	598
TC_Pib	INSEE	0,024	0,021	-0,055	0,075	598
D.RD.hab	EUROSTAT	335,43	240,86	20	1462	598
PI.hab	INSEE	0,0047	0,0012	0,0015	0,0072	598
EGES.hab	DREAL	0,1759	0,7868	0,0024	4,67	598
PEN.hab	DREAL	0,0068	0,0105	0	0,121	598
Dens	INED	132,53	183,32	16	1001	598
TU	INSEE	0,6881	0,1421	0,1631	1	598
SPE	M. Intérieur	0,0755	0,0548	0	0,2127	598

Toujours dans le cadre de l’étude des propriétés statistiques des séries, il est possible avant de procéder à des régressions linéaires en panel, d’effectuer un calcul des variances intra-individuelle et interindividuelle. En effet, la méthode d’estimation d’un modèle de panel est basée sur l’utilisation des composantes de la variabilité (variance). Ainsi, la décomposition de la variance totale de chaque série en deux sous-variances orthogonales : inter-individuelle (ou inter, dite aussi between) et individuelle (ou intra, dite aussi within), nous fournit une indication sur la variabilité dominante. Cette décomposition s’écrit :

$$\mathbf{Var_{tot} = Var_{Intra} + Var_{Inter}}$$

La variance inter-individuelle (between) de la variable dépendante est égale à 0,002 alors que la variance intra-individuelle (Within) est égale à 0,005 pour une variance totale de 0,007, en d'autres termes, les variances inter-individuelle et intra-individuelle représentent respectivement 29 et 71% de la variance totale. Ceci s'explique par l'importance de la différence entre les valeurs effectivement observées d'une année à une autre pour la même région par rapport à la variabilité et aux interactions entre les régions. De même, pour les variables « Log\_Pib » et « TC\_Pib ». Pour le reste des variables, les écarts entre les régions sont plus importants que les différences observées sur toute la période pour la même région.

**Tableau 15** : Variances totales, intra-individuelles et inter-individuelles

Séries	Overall	Between	Within.
<b>Part.ENR.CFTE</b>	0,007	0,002	0,005
<b>Log_Pib</b>	0,012	0,006	0,006
<b>TC_Pib</b>	0,001	0,001	0,000
<b>Log_DRD</b>	0,113	0,080	0,033
<b>LOG_PI</b>	0,017	0,013	0,004
<b>PEN.hab</b>	0,011	0,011	0,000
<b>LOG_EGES</b>	0,772	0,449	0,323
<b>TU</b>	35073	34992	81
<b>DENS</b>	0,021	0,017	0,004
<b>SPE</b>	0,064	0,062	0,002

Toutes les variables exprimées en niveau<sup>37</sup>, notamment le PIB par habitant en valeur, les dépenses en R&D par habitant et les émissions de GES par habitant, seront introduites dans l'analyse économétrique sous forme logarithmique. Le recours à des séries en log permet non seulement de lisser les séries, mais aussi d'estimer et interpréter les coefficients du modèle en termes d'élasticité. Les variables considérées sont ainsi :

- Le PIB par habitant en valeur (Log\_Pib),
- Le taux de croissance du PIB (TC\_Pib),
- Les dépenses en R&D par habitant (Log\_DRD),

<sup>37</sup>Sauf pour la production de l'électricité nucléaire par habitant, puisqu'elle présente des valeurs nulles pour certaines régions.

- La production industrielle par habitant (LOG\_PI),
- Les émissions de GES par habitant (LOG\_EGES),
- La production de l'électricité nucléaire par habitant (PEN.hab),
- La densité de la population régionale (DENS),
- Le taux d'urbanisation (TU), et
- Le score des partis écologistes dans les élections régionales (SPE).

## 2.2 Propriétés des séries

Dans la première étape de notre analyse empirique, il est crucial de déterminer les propriétés statistiques des séries. La plupart des variables économiques, notamment Pib.val.hab, D.RD.hab et PI.hab montrent une tendance croissante dans le temps, et il est important de faire la distinction entre un processus stationnaire avec une tendance déterministe et un processus avec une tendance stochastique ou une racine unitaire. L'étude de la stationnarité s'effectue à l'aide des tests de racine unitaire. Une série qui n'a pas de racine unitaire fluctue autour d'une moyenne constante à long terme. Par conséquent, les chocs n'ont qu'un effet temporaire. Par ailleurs, si une série a une racine unitaire, il est préférable de la caractériser comme un processus non stationnaire qui ne suit pas une trajectoire déterministe à long terme et dont les chocs ont des effets permanents sur la valeur du processus (Ertur, 2017).

Si la série suit un processus stationnaire avec une tendance déterministe, la stationnarité est obtenue en éliminant la tendance temporelle ; si la série a une tendance stochastique ou une racine unitaire, la stationnarité est obtenue en différenciant la série. Enfin, l'étude des propriétés des séries exige la connaissance de la présence ou de l'absence de racines unitaires ; les modèles de régression appliqués à des variables non stationnaires conduisent à des résultats erronés, sauf si les variables sont intégrées.

Les propriétés des séries sont évaluées dans le cadre de données de panel. La double dimension des données de panel permet de pallier une difficulté inhérente aux séries temporelles : la faible puissance des tests de racine unitaire et de cointégration sur des échantillons de petite dimension. En effet, l'ajout de la dimension transversale (les régions françaises) à la dimension temporelle permet de résoudre ce problème en augmentant le

nombre d'observations. Enfin, l'un des avantages des tests de racine unitaire en données de panel est que leur distribution asymptotique est normale contrairement à ceux effectués en séries temporelles qui ont des distributions asymptotiques non standard (Hurlin et Mignon, 2015).

Tout d'abord, nous avons mis en œuvre les tests de Levin et Chien-Fu (1992), Harris-Tzavalis (1999) et Breitung (2001) basés sur l'hypothèse nulle d'un processus de racine unitaire commun. Cependant, l'homogénéité de la racine autorégressive sous l'hypothèse alternative s'avère très restrictive. En effet, dans le cadre de ces tests, l'hétérogénéité consiste à postuler l'existence de constantes spécifiques à chaque individu. Il s'agit bien entendu du modèle à effets individuels (spécifiés de façon fixe ou aléatoire), qui traduit une hétérogénéité uniquement du niveau moyen. L'hypothèse d'homogénéité des autres paramètres du modèle et en particulier de la racine autorégressive est ainsi conservée. C'est pourquoi, nous avons également développé les tests d'Im et al. (2003) et Hadri (2000) qui permettent sous l'hypothèse alternative une hétérogénéité de la racine autorégressive.

Nous avons mis en œuvre plusieurs tests de racine unitaire sous l'hypothèse de l'indépendance transversale. Sous l'hypothèse alternative, certaines séries peuvent être caractérisées par une racine unitaire, tandis que d'autres séries peuvent être stationnaires. Les tests de Levin, Lin et Chu (LLC), de Breitung, de Harris-Tzavalis (H-T) et Im, Pesaran et Shin (IPS) sont basés sur l'hypothèse nulle de racine unitaire, alors que le test de Hadri est basé sur l'hypothèse nulle de stationnarité. Les résultats de ces différents tests, présentés dans le tableau 16, sont concordants pour les quatre tests (LLC, Breitung, H-T et IPS), sauf pour les variables : Log\_Pib, Log\_DRD et PEN. Pour un risque d'erreur de 1%, l'hypothèse de racine unitaire est souvent rejetée lorsque les séries sont en niveau excepté pour les variables PART EnR, Log\_PI, DENS, Log\_Pib (sauf pour les tests de LLC et IPS), Log DRD (sauf pour les tests de Breitung, H-T et IPS) et PEN (sauf pour le test de LLC) alors qu'elle est systématiquement rejetée lorsque les séries sont en différences premières. Toutes les variables sont donc stationnaires en différence première.

Au regard des quatre premiers tests, les variables PART EnR, Log\_PI, DENS sont intégrées d'ordre 1 ( $I(1)$ ), alors que les variables TC\_Pib, Log\_EGES, TU et SPE sont stationnaires. Enfin, dans le cadre du test de Hadri, l'hypothèse nulle de stationnarité est toujours rejetée pour un risque d'erreur de 1%, que ce soit pour les séries en niveau ou en différence

première (sauf pour les séries en différence première : TC\_Pib, PEN, Log\_EGES, TU et SPE).

**Tableau 16** : Tests de racine unitaire en panel (première génération)

<b>Variable</b>	<b>LLC</b>	<b>Breitung</b>	<b>H-T</b>	<b>IPS</b>	<b>Hadri</b>
<i>Variables en niveau</i>					
<b>PART EnR</b>	10.02	7.3	1.11	14.32	40.94***
<b>Log_Pib</b>	-6.25 ***	12.29	0.96	-1.97 ***	73.67***
<b>TC_Pib</b>	-8.04 ***	-5.86 ***	0.21***	-10.57 ***	10.88***
<b>Log_DRD</b>	-2.45 ***	10.49	0.94	2.99	69.74 ***
<b>Log_PI</b>	-0.98	4.82	0.97	3.01	65.94 ***
<b>PEN</b>	2.11	-5.17 ***	0.04***		3.67 ***
<b>Log_EGES</b>	-3.48 ***	-2.12 ***	0.13***	-7.67 ***	8.26 ***
<b>TU</b>	-39.22 ***	-5.46 ***	0.24***	-8.75 ***	12.5 ***
<b>DENS</b>	2.42	11.96	1.01	6.68	74.92 ***
<b>SPE</b>	-3.46 ***	-5.45 ***	0.68***	-3.49 ***	7.79 ***
<i>Variables en différence première</i>					
<b>PART EnR</b>	-4.22 ***	-10.8 ***	0.30***	-8.98 ***	18.51 ***
<b>Log_Pib</b>	-9 ***	-11.49 ***	0.20***	-9.52 ***	7.95 ***
<b>TC_Pib</b>	-17.76 ***	-11.84 ***	-0.34***	-15.44 ***	-4.16
<b>Log_DRD</b>	-106 ***	-13.01 ***	-0.33***	-13.09 ***	-3.62
<b>Log_PI</b>	-12.87 ***	-12.12 ***	0.12***	-11.09 ***	1.35 ***
<b>PEN</b>	-2.52 ***	-5.17 ***	-0.50***		-4.67
<b>Log_EGES</b>	-12.86 ***	-2.12 ***	-0.48***	-15.41 ***	-4.6
<b>TU</b>	-93.44 ***	-4.58 ***	-0.46***	-18.16 ***	-4.39
<b>DENS</b>	-8.68 ***	-11.11 ***	-0.25***	-13.63 ***	8.74 ***
<b>SPE</b>	-8.81 ***	-15.45 ***	-0.002***	-10.97 ***	-1.16

\*\*\*Le rejet de l'hypothèse nulle au niveau de 1 %.

Au-delà de leur diversité, ces tests de première génération font face à un problème majeur: le problème de l'indépendance interindividuelle (indépendance des résidus chez Levin et Lin, ou chez IPS). En effet, la vérification de cette hypothèse permet de dériver des lois asymptotiques normales des statistiques de ces tests. Par conséquent, de nombreuses études empiriques ((Evans et Karras, 1996; Gaulier, Hurlin et Jean-Pierre, 1999) supposant l'indépendance transversale des écarts de PIB par tête à la moyenne internationale se sont trouvées confrontées à ce problème en dépit de l'introduction d'effets temporels pour capter les effets de conjoncture internationale. Pour tester la dépendance en coupe transversale de chaque variable, nous allons utiliser le test de Pesaran (2004). Le Tableau 17 présente les résultats obtenus. L'hypothèse nulle  $H_0$  est qu'il y a indépendance en coupe transversale. La



statistique CD de Pesaran est basée sur la moyenne des coefficients de corrélation entre les différentes régions prises deux-à-deux pour chaque année. Sous l'hypothèse nulle, cette statistique est asymptotiquement distribuée selon une normale standard centrée réduite. La moyenne des coefficients est indiquée par  $\text{Moy}.\rho$  et celle de la valeur absolue des coefficients de corrélation par  $\text{Moy}|\rho|$ .

Le Tableau 17 indique clairement la présence d'une forte dépendance en coupe transversale pour toutes les variables pour l'ensemble des régions.

**Tableau 17** : Test de la dépendance en coupe transversale de Pesaran 2004.

	PartENRCFTE	Log_Pib	TCPIbhab	Log_DRD	Log_PI	Log_EGES	TU	Dens	SPE
CD-test	61.346	80.329	54.676	74.279	70.866	9.786	15.655	67.203	52.941
p-valeur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Moy. $\rho$	0.76	0.99	0.67	0.92	0.87	0.12	0.19	0.83	0.65
Moy $ \rho $	0.76	0.99	0.67	0.92	0.87	0.54	0.60	0.86	0.74

Nous allons donc envisager des tests de racine unitaire qui tiennent compte de la dépendance transversale, appelés tests de deuxième génération. Nous avons appliqué les tests de Pesaran (2007) et Pesaran (2003) sur la base de l'hypothèse nulle de la racine unitaire pour toutes les unités et d'une hypothèse alternative hétérogène. Dans les deux tests, une structure de facteurs communs non observée est présumée expliquer la corrélation transversale. Les tests de racine unitaire augmentée transversalement de Pesaran (2007) sont conçus pour les cas où la dépendance transversale est due à un seul facteur. On tient compte de la dépendance transversale en augmentant les régressions de Dickey-Fuller individuelles augmentées par la moyenne transversale de la variable dépendante. Ces moyennes transversales sont utilisées comme approximations du facteur commun unique supposé non observé. La statistique du test proposée par Pesaran, appelée CIPS, est alors basée sur la moyenne des statistiques individuelles des unités transversales. Pour ce test, l'hypothèse nulle  $H_0$  est que chaque série temporelle individuelle contient une racine unitaire. L'hypothèse alternative est qu'une partie des séries sont stationnaires. Les valeurs reportées dans les tableaux 18 et 19 correspondent à la statistique du test CIPS (ou encore statistique  $(Z_{t\text{-bar}})$  pour toutes les variables du modèle. Le test est effectué dans le cas où une constante, propre à chaque région, ainsi qu'une tendance linéaire sont ajoutées dans le modèle.

**Tableau 18 : Test de racine unitaire de Pesaran (2007) (variables en niveau)**

Constante										
Retard	PART EnR	Log_Pib	TC_Pib	Log_DRD	Log_PI	PEN	Log_EGES	TU	DENS	SPE
1	-1.9	-2.7***	-4.6***	-2.7***	-1.5	-0.5	-2.7***	-0.5	-2.9***	-1.4
2	-2.3***	-2.7***	-4.6***	-2.5***	-1.5	-0.5	-2.7***	-0.7	-2.9***	-1.4
3	-2.0***	-2.9***	-4.7***	-2.5***	-1.6	-0.5	-2.8***	-0.6	-2.9***	-1.5
Tendance linéaire										
Retard	PART EnR	Log_Pib	TC_Pib	Log_DRD	Log_PI	PEN	Log_EGES	TU	DENS	SPE
1	-2.6	-2.4	-4.6***	-3.1***	-1.8	-1.2	-3.1***	-2.4	-3.1***	-1.6
2	-2.9***	-2.4	-4.5***	-3.0***	-1.8	-1.2	-3.1***	-2.6	-3.0***	-1.6
3	-2.8***	-2.6	-4.5***	-3.1***	-1.8	-1.2	-3.2***	-2.6	-3.1***	-1.6

**Tableau 19 : Test de racine unitaire de Pesaran (2007) (variables en différence première)**

Constante										
Retard	Δ PART									
	EnR	Δ Log_Pib	Δ TC_Pib	Δ Log_DRD	Δ Log_PI	Δ PEN	Δ Log_EGES	Δ TU	Δ DENS	Δ SPE
1	-4.8***	-4.6***	-6.1***	-5.7***	-4.6***	-1.5	-4.7***	-5.7***	-5.5***	-3.7***
2	-4.8***	-4.5***	-6.1***	-5.6***	-4.7***	-1.5	-4.7***	-5.8***	-5.6***	-3.8***
3	-4.9***	-4.7***	-6.0***	-5.7***	-4.6***	-1.5	-4.7***	5.8***	-5.6***	-3.8***
Tendance linéaire										
Retard	Δ PART									
	EnR	Δ Log_Pib	Δ TC_Pib	Δ Log_DRD	Δ Log_PI	Δ PEN	Δ Log_EGES	Δ TU	Δ DENS	Δ SPE
1	-4.9***	-4.6***	-6.2***	-5.8***	-4.8***	-2.1	-4.9***	-6.0***	-5.9***	-3.9***
2	-5.0***	-4.5***	-6.2***	-5.8***	-4.8***	-2.0	-4.9***	-6.0***	-5.9***	-3.9***
3	-5.1***	-4.6***	-6.1***	-5.7***	-4.9***	-2.1	-4.9***	-6.1***	-5.8***	-4.0***

Des tableaux 18 et 19, on peut déduire que les variables Les variables PART EnR, Log\_Pib, Log\_PI, TU et SPE sont non stationnaires en niveau mais stationnaires en différences premières, elles sont donc intégrées d'ordre 1. La série PEN n'est pas stationnaire que ce soit en niveau ou en différence première. Pour le reste des variables (TC\_Pib, Log\_DRD, Log\_EGES, DENS), l'hypothèse nulle de racine unitaire est systématiquement rejetée au seuil de 1% pour les séries en niveau et en différence première.

Pesaran (2003) propose un test unique (contrairement à Bai et Ng, 2004) permettant de tenir compte des éventuelles dépendances entre individus. Mais à la différence des tests de (Moon et Perron, 2003), Pesaran ne teste pas la racine unitaire sur des variables transformées prises en écart aux composantes déterministes. Il choisit au contraire de conserver les séries brutes en augmentant le modèle DF ou ADF par l'introduction des moyennes individuelles et des différences premières : on obtient alors un modèle augmenté de type CADF (Cross Sectionally Augmented Dickey-Fuller). De ce point de vue, le test de Pesaran (2003) se démarque des tests précédemment présentés dans la mesure où les distributions asymptotiques sont non standards. Les résultats de ce test (voir annexe tableau A8) nous amènent, pour un risque d'erreur niveau de 1%, à rejeter l'hypothèse nulle d'une racine unitaire pour les séries ; PART EnR, Log\_Pib, TC\_Pib, Log\_DRD, TU et DENS. Les variables Log\_PI, Log\_EGES et SPE sont non stationnaires en niveau mais stationnaires en différences premières, elles sont donc intégrées d'ordre 1. La série PEN n'est pas stationnaire que ce soit en niveau ou en différence première

Enfin, nos résultats montrent que sous l'hypothèse de l'indépendance transversale, un certain nombre de séries sont stationnaires, alors que pour d'autres, l'hypothèse de la racine unitaire est acceptée. Les tests de deuxième génération qui tiennent compte de la dépendance transversale confirment ce résultat. Cependant, toutes les variables sont stationnaires en différences premières ce qui justifie l'analyse de la cointégration dont nous allons tester la présence par la suite.

### **Section 3 : Résultats économétriques**

#### **3.1 Analyse de long terme**

Dans cette partie, nous allons utiliser des tests de cointégration pour données de panel entre les variables du modèle. Rappelons que pour éviter des régressions fallacieuses, les variables doivent être cointégrées (Pesaran et Smith (1995), Pesaran (2006), Pesaran et Yamagata (2011)). L'idée sous-jacente est que les séries de données cointégrées peuvent évoluer séparément à court terme, mais qu'il existe des forces qui les font évoluer ensemble à long terme. En revanche, l'absence de cointégration suggère que les variables n'ont pas de lien à long terme.

Pour appréhender les relations à long terme entre la part des EnR dans la consommation finale d'énergie et les variables explicatives, nous mettons en œuvre des tests de cointégration

bivariés tant sur des données de séries chronologiques régionales que sur des données de panel. L'étude de la cointégration sur des séries chronologiques régionales permet d'identifier les relations à long terme entre les deux séries à l'échelle régionale, tandis que l'étude de la cointégration sur des données de panel fournit des informations complètes à l'échelle nationale. De plus, comme les tests de cointégration souffrent d'une faible puissance sur de petits échantillons comme dans le cas des tests de racine unitaire, l'ajout de la dimension individuelle à la dimension temporelle habituelle augmente la puissance des tests de cointégration.

Comme pour les tests de première génération de racine unitaire en panel, la distinction entre les différents tests de cointégration tient à la présence ou non d'hétérogénéité au sein du panel. Nous considérons les tests proposés par Pedroni (1999, 2004), Kao (1999) et Westerlund (2007). Pedroni a proposé des tests fondés sur l'hypothèse nulle d'absence de cointégration intra-individuelle pour les panels hétérogènes. Sur les sept tests proposés par Pedroni, quatre sont basés sur la dimension within (intra) et trois sur la dimension between (inter). Les deux catégories de tests reposent sur l'hypothèse nulle d'absence de cointégration. Le test de Kao est également basé sur l'hypothèse nulle de l'absence de cointégration et suppose l'homogénéité des vecteurs de cointégration dans la dimension individuelle. Westerlund (2007) a proposé un test de cointégration fondé sur la dynamique structurelle plutôt que sur la dynamique résiduelle et qui, par conséquent, n'impose aucune restriction quant aux facteurs communs. L'idée est de vérifier l'hypothèse nulle d'absence de cointégration en testant la significativité du terme à correction d'erreur dans un modèle à correction d'erreur conditionnel.

Les 3 tests présentés dans le tableau 20 nous amènent à rejeter l'hypothèse de non-cointégration et à conclure à l'existence d'une relation de cointégration entre la part des EnR dans la consommation finale d'énergie et toutes les variables explicatives.

**Tableau 20:** Tests de cointégration en panel

Variable	Pedroni						Kao	Westerlund
	Tests basés sur la dimension within			Tests basés sur la dimension between			t-stat	Variance ratio
	Rho-stat	PP-stat	ADF-stat	Rho-stat	PP-stat	ADF-stat		
PART EnR /Log_Pib	5.40 (0.00)	8.30 (0.00)	11.97 (0.00)	4.13 (0.00)	6.41 (0.00)	8.79 (0.00)	2.48 (0.006)	-1.91 (0.02)
PART EnR /TCPibhab	5.38 (0.00)	8.57 (0.00)	8.46 (0.00)	3.75 (0.0001)	5.94 (0.00)	5.62 (0.00)	4.91 (0.00)	1.60 (0.05)
PART EnR /Log_DRD	4.83 (0.00)	6.84 (0.00)	9.25 (0.00)	3.07 (0.001)	4.35 (0.00)	5.95 (0.00)	2.89 (0.001)	-1.66 (0.04)
PART EnR /Log_PI	5.31 (0.00)	8.15 (0.00)	10.49 (0.00)	3.82 (0.001)	5.84 (0.00)	7.32 (0.00)	2.66 (0.003)	-1.35 (0.08)
PART EnR /PENhab	4.02 (1.00)	6.94 (1.00)	5.43 (1.00)	3.97 (1.00)	7.21 (1.00)	6.84 (1.00)	4.65 (0.00)	3.14 (0.0008)
PART EnR /Log_EGES	6.05 (0.00)	10.7 (0.00)	10.62 (0.00)	4.90 (0.00)	8.00 (0.00)	7.61 (0.00)	5.11 (0.00)	1.79 (0.03)
PART EnR /TU	5.83 (0.00)	10.65 (0.00)	11.22 (0.00)	4.83 (0.00)	7.81 (0.00)	8.23 (0.00)	5.14 (0.00)	2.32 (0.01)
PART EnR /Dens	4.16 (0.00)	5.72 (0.00)	7.79 (0.00)	2.79 (0.002)	4.00 (0.00)	5.51 (0.00)	4.78 (0.00)	-2.15 (0.01)
PART EnR /SPE	6.70 (0.00)	14.30 (0.00)	15.28 (0.00)	6.05 (0.00)	10.93 (0.00)	11.50 (0.00)	6.92 (0.00)	3.33 (0.0004)

Bien que les estimateurs MCO des vecteurs de cointégration soient super-convergentes, leur distribution est asymptotiquement biaisée et dépend de paramètres de nuisance associés à la présence de corrélation sérielle dans les données (voir Kao et Chen, 1995 ; Pedroni, 1996 et Kao et Chiang, 2000). De tels problèmes, existant dans le cas traditionnel temporel univarié,

se posent également pour les données de panel et ont tendance à être encore plus marqués en présence d'hétérogénéité (voir notamment Kao et Chen, 1995).

Pour estimer des systèmes de variables cointégrées, tout comme pour effectuer des tests sur les vecteurs de cointégration, il est en conséquence nécessaire d'utiliser une méthode d'estimation efficace. Diverses techniques peuvent être employées, telles que la méthode FM-OLS (Fully Modified Ordinary Least Squares) initialement proposée par Phillips et Hansen (1990) ou la méthode des moindres carrés dynamiques (Dynamic Ordinary Least Squares, DOLS) de Saikkonen (1991) et Stock et Watson (1993). Dans le cas des données de panel, Kao et Chiang (2000) ont montré que ces deux techniques conduisent à des estimateurs distribués asymptotiquement selon une loi normale de moyenne nulle. Des résultats similaires sont obtenus par Pedroni (1996) et Phillips et Moon (1999) pour la méthode FM-OLS.

Pour conclure, mentionnons que Kao et Chiang (2000) se sont intéressés aux propriétés en échantillon fini des estimateurs des MCO, FM-OLS et DOLS. Leur étude met en avant que l'estimateur des MCO souffre d'un important problème de biais et que l'estimateur FM-OLS ne permet pas d'améliorer de façon substantielle l'estimateur des MCO. Ils concluent alors à la supériorité de l'estimateur DOLS pour l'estimation des relations de cointégration sur données de panel.

Pour les deux estimateurs FM-OLS et DOLS, la relation de long terme peut être formulée par l'équation suivante :

$$\text{PART EnR}_{i,t} = \alpha_i + \beta_i \text{Log\_Pib}_{i,t} + \gamma_i \text{TC\_Pib}_{i,t} + \delta_i \text{Log\_DRD}_{i,t} + \theta_i \text{Log\_PI}_{i,t} + \lambda_i \text{PEN}_{i,t-2} + \varphi_i \text{Log\_EGES}_{i,t-2} + \partial_i \text{TU}_{i,t} + \omega_i \text{DENS}_{i,t} + \vartheta_i \text{SPE}_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

Où  $i$ ,  $t$ ,  $\alpha_i$  et  $\varepsilon_{i,t}$  correspondent respectivement à la région, le temps, l'effet fixe régional et le terme d'erreur.  $\beta_i$ ,  $\delta_i$ ,  $\theta_i$ ,  $\varphi_i$  sont respectivement les élasticités de la consommation d'énergie renouvelable par rapport au PIB, aux dépenses en recherche et développement, à la production industrielle et aux émissions de gaz à effet de serre. Enfin,  $\gamma_i, \lambda_i, \partial_i, \omega_i, \vartheta_i$  correspondent aux coefficients associés aux variables, taux de croissance du PIB, production de l'électricité nucléaire, taux d'urbanisation, densité et score des partis écologistes.

Par ailleurs, certaines variables, notamment, les émissions de gaz à effet de serre et la production de l'électricité nucléaire par habitant ainsi que le score des partis écologistes sont

introduites dans le modèle sous forme de retards dans la mesure où leur effet sur la part de consommation des EnR n'est pas supposé immédiat. Nous avons testé plusieurs structures de retards, la plus optimale est celle présentée dans l'équation (1).

**Tableau 21** : Résultats des estimations DOLS et FM-OLS

Variables	DOLS		FMOLS	
	Coefficient	t-stat.	Coefficient	t-stat.
Log_Pib	0.66(0.101)*	1.22	1.04 (0.10)*	1.6
TC_Pib	0.81 (0.446)	0.98	0.31 (0.444)	0.76
Log_DRD	0.232 (0.07)*	1.80	0.25 (0.08) *	1.74
LOG_PI	0.59 (0.254)	1.14	1.13 (0.05) **	1.90
PEN.hab (-2)	0.84 (0.458)	0.74	0.15 (0.886)	0.14
LOG_EGES (-2)	-0.09(0.375)	-0.88	-0.07 (0.474)	-0.71
TU	0.042(0.810)	0.24	0.11 (0.568)	0.57
DENS	0.01 (0.002) ***	3.08	0.01 (0.003) ***	2.9
SPE (-1)	0.85(0.000) ***	5.28	0.83 (0.0001) ***	4.12
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.51</b>		<b>0.59</b>	

Note : \*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1 et les nombres entre parenthèses indiquent les valeurs de probabilités.

Conformément aux résultats d'Apergis et Payne (2010b), Sadorsky (2009a) et Ben Jebli et al. (2014), les estimations des relations de long terme entre les séries temporelles régionales indiquent que le niveau de développement de l'économie, mesurée par le log du PIB par habitant explique significativement la part d'EnR dans la consommation finale d'énergie. Une augmentation de 1 % du PIB par habitant augmente la part de la consommation d'EnR de : 0,66%. On peut conclure qu'une croissance économique durablement élevée stimule la transition énergétique en encourageant la consommation d'énergies alternatives capables de compenser en partie l'épuisement des ressources fossiles. Ce résultat milite en faveur des politiques gouvernementales de développement du secteur des EnR et peut fournir des renseignements précieux pour les décideurs politiques. En effet, un développement économique soutenu signifie un plus grand potentiel à supporter des coûts réglementaires élevés et également plus de ressources disponibles pour mettre en œuvre et promouvoir l'utilisation des EnR.

Les résultats indiquent également que le volume des dépenses en recherche et développement agit positivement sur la part de la consommation d'EnR. Ces dépenses

favorisent le recours aux énergies renouvelables dans la mesure où une augmentation de 1 % des dépenses en recherche & développement par habitant augmente la part de la consommation d'EnR de 0,232%. La dépense publique de recherche et développement (R&D) consacrée aux énergies renouvelables s'élève à 126 M€ en 2017, soit 13 % de la dépense publique totale de R&D pour l'énergie (973 millions d'euros en 2017). Cette dépense se concentre principalement dans deux filières : le solaire (43 % de la dépense, soit 55 M€) et la biomasse (41 %, soit 52 M€). Pour cette dernière, la dépense porte principalement sur les biocarburants et dans une moindre mesure sur le biogaz. Un investissement croissant dans la recherche & développement en EnR est donc en mesure d'accroître la compétitivité de ces énergies et remédier aux principaux défis technologiques auxquels, elles font face, notamment, les problèmes d'intermittence et de stockage, ce qui, sur le long terme permettra d'accroître la part des EnR dans la consommation totale d'énergie.

D'une autre part, l'impact de la structure de l'économie, notamment de l'industrialisation, sur l'environnement a été aussi mis en avant comme un facteur explicatif de la consommation des EnR. Les estimations du modèle FM-OLS confirment l'effet positif de la production industrielle sur la part des EnR dans la consommation finale d'EnR. Sur le long terme, les régions industrialisées auront tendance à se détacher des tendances énergétiques habituelles (fossile et nucléaire) et consommer plus d'EnR dans le but de diversifier leur bouquet énergétique.

Les résultats montrent également l'existence d'une relation positive statistiquement fortement significative entre le score des partis écologistes et la consommation d'énergie renouvelable. À l'échelle régionale, le poids des partis « verts » influence positivement l'essor des EnR. Le score des partis écologistes traduit l'orientation de la région vers les questions environnementales et nous renseigne sur le degré d'engouement des électeurs pour la cause environnementale. A l'échelle des pays, ce résultat a été mis en évidence par Aklin et Urpelain en (2013) et Dumas et al (2016). Ces auteurs ont montré que les gouvernements " verts " favorisent le soutien public aux EnR. Karlstrøm et Ryghaug (2014) ont également établi que la préférence pour les partis politiques verts a un impact important sur les attitudes envers les technologies énergétiques en Norvège.

Finalement, les résultats révèlent également l'existence d'un effet significativement positif de la densité de la population sur la consommation d'EnR. Contrairement à Salim et Shafiei (2014), nous montrons que la consommation d'EnR en France est expliquée par la densité de



la population. Ainsi, l'accroissement de la densité de population se traduit par une augmentation de la consommation énergétique renouvelable toutes choses égales par ailleurs dans la mesure où les besoins énergétiques d'une région dépendent de sa population et de son mode de vie.

### 3.2 Analyse de court terme

#### 3.2.1 Estimation du modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM)

Dans les séries chronologiques, il est courant de faire la distinction entre les analyses à court terme et à long terme. Si les effets à long terme sont importants pour la mise en œuvre des politiques de développement des EnR, l'analyse de court terme fournit des informations utiles pour identifier les interactions entre variables et ajustements dynamiques. L'utilisation de tests de causalité nous permet de révéler l'orientation des relations existantes entre les variables.

La présence d'une relation de cointégration permet de recourir à une représentation VECM (modèle vectoriel à correction d'erreur). Le VECM est un modèle qui permet de modéliser les ajustements qui conduisent à une situation d'équilibre à long terme. Nous utilisons l'approche d'Apergis et al. (2010) afin d'analyser les relations de court terme entre les séries temporelles régionales. D'un point de vue strictement technique, le nombre de paramètres à estimer dans ce modèle croît avec le nombre de retards. Les valeurs du critère AIC nous conduisent à retenir deux retards.

L'écriture initiale du modèle VECM est la suivante :

$$\begin{aligned} \Delta PART\ EnR_t = & \alpha_{10} + \sum_{i=1}^2 \alpha_{1i} \Delta PART\ EnR_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \beta_{1i} \Delta Log\_Pib_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \gamma_{1i} \Delta TC\_Pib_{t-i} + \\ & \sum_{i=1}^2 \theta_{1i} \Delta Log\_DRD_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \vartheta_{1i} \Delta Log\_PI_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \mu_{1i} \Delta PEN_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \pi_{1i} \Delta Log\_EGES_{t-i} + \\ & \sum_{i=1}^2 \sigma_{1i} \Delta TU_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \tau_{1i} \Delta DENS_{t-i} + \sum_{i=1}^2 \omega_{1i} \Delta SPE_{t-i} + \varphi_1 PART\ EnR_{t-1} + \varphi_2 Log\_Pib_{t-1} + \\ & \varphi_3 TC\_Pib_{t-1} + \varphi_4 Log\_DRD_{t-1} + \varphi_5 Log\_PI_{t-1} + \varphi_6 PEN_{t-1} + \varphi_7 Log\_EGES_{t-1} + \varphi_8 TU_{t-1} + \\ & \varphi_9 DENS_{t-1} + \varphi_{10} SPE_{t-1} + \varepsilon_{1t} \end{aligned}$$

De façon détaillée, le modèle s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \Delta PART\ EnR_t = & C_{22} + C_1 * (\varphi_0 + \varphi_1 PART\ EnR_{t-1} + \varphi_2 Log\_Pib_{t-1} + \varphi_3 TC\_Pib_{t-1} + \\ & \varphi_4 Log\_DRD_{t-1} + \varphi_5 Log\_PI_{t-1} + \varphi_6 PEN_{t-1} + \varphi_7 Log\_EGES_{t-1} + \varphi_8 TU_{t-1} + \varphi_9 DENS_{t-1} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varphi_{10}\text{SPE}_{t-1}) + C_2\Delta\text{PART EnR}_{t-1}+C_3\Delta\text{PART EnR}_{t-2} + C_4\Delta\text{Log\_Pib}_{t-1}+C_5\Delta\text{Log\_Pib}_{t-2} + \\ & C_6\Delta\text{TC\_Pib}_{t-1}+ C_7\Delta\text{TC\_Pib}_{t-2} + C_8\Delta\text{Log\_DRD}_{t-1}+C_9\Delta\text{Log\_DRD}_{t-2} + C_{10}\Delta\text{Log\_PI}_{t-1} + \\ & C_{11}\Delta\text{Log\_PI}_{t-2} + C_{12}\Delta\text{PEN}_{t-1}+C_{13}\Delta\text{PEN}_{t-2}+C_{14}\Delta\text{Log\_EGES}_{t-1}+C_{15}\Delta\text{Log\_EGES}_{t-2} + \\ & C_{16}\Delta\text{TU}_{t-1} + C_{17}\Delta\text{TU}_{t-2} + C_{18}\Delta\text{DENS}_{t-1} + C_{19}\Delta\text{DENS}_{t-2} + C_{20}\Delta\text{SPE}_{t-1}+C_{21}\Delta\text{SPE}_{t-2} + \varepsilon_{1t} \end{aligned}$$

Le tableau suivant présente les résultats des estimations :

**Tableau 22:** Résultat de l'estimation du modèle VECM

	Coefficient	Std.Error	t-Statistic	Prob
C(1)	0.0003	0.001	0.304	0.760
C(2)	0.234	0.044	5.327	0.000
C(3)	0.197	0.044	4.473	0.000
C(4)	3.264	1.039	3.141	0.002
C(5)	1.754	1.052	1.667	0.095
C(6)	0.916	0.450	2.034	0.041
C(7)	0.092	0.045	2.057	0.039
C(8)	-0.002	0.020	-0.103	0.917
C(9)	0.002	0.018	0.128	0.897
C(10)	-0.136	0.075	-1.813	0.069
C(11)	-0.008	0.076	-0.105	0.916
C(12)	-0.339	0.138	-2.454	0.014
C(13)	0.118	0.138	0.856	0.391
C(14)	0.001	0.009	0.177	0.859
C(15)	-0.006	0.009	-0.729	0.465
C(16)	-0.021	0.017	-1.176	0.239
C(17)	-0.017	0.013	-1.243	0.213
C(18)	-0.001	0.001	-1.067	0.285
C(19)	0.002	0.001	1.509	0.131
C(20)	0.015	0.027	0.577	0.563
C(21)	0.009	0.026	0.357	0.721
C(22)	0.0179	0.015	1.170	0.241

Les estimations indiquent que la part des EnR la consommation d'énergie renouvelable dépend de ses valeurs passées ((t-1) et (t-2)). Le PIB réel par habitant (retardé d'une période) qui traduit le niveau de développement économique de la région, a un impact positif sur la consommation d'énergie renouvelable. Les résultats montrent également que le niveau de croissance économique à la période passée mesuré par le taux de croissance du PIB réel affecte positivement la consommation des EnR. A court terme, une croissance économique

forte favorise le recours aux sources d'EnR. S'il paraît évident que la croissance économique s'accompagne d'une progression marquée de la demande énergétique, le renforcement des EnR doit apparaître au centre des préoccupations des politiques publiques et mobiliser des efforts soutenus en termes d'investissement. Les résultats montrent également que les productions nucléaire et industrielle par habitant impactent négativement la consommation des EnR. A court terme, l'énergie nucléaire semble constituer un frein à la promotion des EnR. Les régions dont le nucléaire est l'énergie prépondérante auront tendance à consommer moins d'EnR dans leur mix énergétique.

### 3.2.2 Tests de causalité

#### a) Tests de causalité de Granger sur des séries temporelles régionales

Afin d'analyser les liens à court terme entre la part des EnR dans la consommation finale d'énergie et les autres variables, nous avons effectué des tests de non-causalité de Granger dans un cadre bivarié sur des séries temporelles régionales et des tests de causalité en panel.

La relation causale entre les variables explicatives et la part des EnR dans la consommation finale d'énergie a été examinée en utilisant l'analyse de causalité de Granger du modèle à correction d'erreur vectorielle. Le test de causalité nous donne l'orientation de la causalité mais pas le signe. Nous focalisons notre analyse sur les liens de causalité unidirectionnelle des variables explicatives vers la variable endogène, dans la mesure où nous nous intéressons essentiellement sur l'effet de ces variables sur la part des EnR dans la consommation finale d'énergie.

Nos résultats, présentés dans le tableau 23, indiquent qu'il existe une causalité unidirectionnelle allant de la croissance économique (Log\_Pib) à la consommation des EnR (Part EnR) en Auvergne, Bretagne, Champagne-Ardenne, Franche-Comté, Ile-de-France, Midi-Pyrénées, Pays de la Loire et Picardie. Une augmentation du PIB peut entraîner une augmentation de la consommation des EnR dans ces régions. La croissance économique se traduit dans ces régions -entre autres- par de nouvelles opportunités de promotion des EnR. Dans ce cas, on pourrait déduire que pour ces régions, la consommation des EnR est sensible à la situation économique de la région. Une relation bidirectionnelle entre ces deux variables apparaît en Basse-Normandie et en Poitou-Charentes dans le sens où la consommation des EnR peut affecter positivement la croissance économique qui à son tour favorise le recours aux sources d'EnR.

Un autre lien causal est également trouvé entre le volume des dépenses en recherche et développement et notre variable dépendante. En effet, pour les régions, Basse-Normandie, Franche-Comté, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes, la causalité unidirectionnelle va de Log\_DRD à Part EnR. En effet, les programmes de recherche et développement constituent le mode de soutien au déploiement des énergies renouvelables le plus ancien. Ils ont pour but d'améliorer la performance des technologies exploitant les énergies renouvelables encore éloignées de la maturité commerciale (Lamy, 2004). Nous notons que ces régions se caractérisent par des niveaux moyens de consommation d'EnR au cours de la période d'analyse, l'investissement dans la recherche et développement en énergie peut donc contribuer à la réussite de la transition énergétique dans ces régions. En Franche-Comté, cette causalité est bidirectionnelle, une forte consommation des EnR incite la région à dédier plus de fonds en matière de dépenses en recherche et développement en énergie renouvelable.

Au niveau régional, on constate que peu de relations de causalité entre la structure économique de la région, mesurée par la production industrielle par habitant, et la part des EnR dans la consommation finale d'énergie sont significative au seuil de 5 %. Une relation unidirectionnelle apparaît entre ces deux variables allant de la production industrielle par habitant à la part des EnR dans la consommation finale d'énergie en Aquitaine, Basse-Normandie, Franche-Comté, et Picardie, alors qu'en Alsace, la causalité est bidirectionnelle.

Nous notons également l'existence d'une relation bidirectionnelle entre la production de l'électricité nucléaire et la part des EnR dans la consommation finale d'énergie dans la région Basse-Normandie. En effet, le développement historique de la filière nucléaire dans la région s'est fait au détriment de son homologue renouvelable, le nucléaire occupe toujours une place de leader dans le mix électrique de la région. La montée en puissance des nouvelles filières renouvelables, notamment l'éolien ne s'est pas accompagné d'une baisse de la production nucléaire dans la région. Au cours de la période 1990-2015, la part des EnR dans la consommation finale d'énergie dans la région Basse-Normandie a augmenté de 47% alors que le taux de croissance de la production nucléaire par habitant est de l'ordre de 9%.

Les résultats du lien entre la consommation des EnR et l'ensemble des variables explicatives montrent également qu'il existe une causalité bidirectionnelle entre de la part des EnR dans la consommation finale d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans les DOM. Les émissions des gaz à effet de serre peuvent être un élément favorisant la consommation d'EnR qui à son tour, peut contribuer à la réduction de ces émissions. En

1990, année de référence des politiques internationales en matière d'émissions de gaz à effet de serre, les territoires d'outre-mer ont émis 12 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone (EDC), soit seulement 2,4% des émissions françaises totales (tous chiffres issus du CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique, 2015). Cette année-là, ils ont émis 6,2 tonnes d'EDC par habitant contre 9 tonnes d'EDC pour les habitants de la France métropolitaine. En 2014, alors que les émissions globales de gaz à effet de serre de la France ont diminué (de 521 à 415 millions de tonnes), les émissions de l'Outre-mer sont passées à 23 millions de tonnes, soit 5,6% des émissions françaises totales. Cela signifie qu'en 2014, l'Outre-mer a émis plus de gaz à effet de serre par habitant (8,5 tonnes d'EDC) que la France métropolitaine (6,1 tonnes d'EDC). Néanmoins, il est important de noter que les émissions de gaz à effet de serre résultent non seulement des modes de consommation et des modes de vie - qui varient considérablement au sein de l'Outre-mer - mais aussi des types d'utilisation des sols et des modes de production énergétique. En effet, les émissions élevées de gaz à effet de serre par habitant dans les DOM résultent d'une grande dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles tels que le charbon et le pétrole. Tous les Outre-mer utilisent plus de 80% de combustibles fossiles pour l'énergie primaire : 82% en Guyane (2012), 99% à Mayotte (2011) et 93% en Martinique et Guadeloupe en 2012 (Bareigt et Fasquelle, 2014). Malgré de bonnes conditions pour développer l'énergie hydroélectrique, solaire, géothermique et éolienne, l'EnR n'est considérée que comme un complément aux sources d'énergie fossiles, à l'exception de la Guyane et de la Réunion qui utilisent l'hydroélectricité pour produire de l'électricité.

Enfin, nous constatons l'existence d'une causalité unidirectionnelle allant de la densité de la population à la part des EnR dans la consommation finale d'énergie en Aquitaine, Auvergne, Bourgogne, Bretagne, Centre, Languedoc-Roussillon, Pays de la Loire et Poitou-Charentes; et une causalité bidirectionnelle entre le score des partis écologistes et la consommation des EnR pour les régions; Corse, Midi-Pyrénées et Picardie.

**Tableau 23:** Tests de non-causalité bivariés de Granger

Région	Log_Pib et Part EnR		TCPibhab et Part EnR		Log_DRD et Part EnR		Log_PI et Part EnR		PENhab et Part EnR		Log-EGES et Part EnR		TU et Part EnR		Dens et Part EnR		SPE et Part EnR	
	Log_Pib	Part EnR	TCPibhab	Part EnR	Log_DRD	Part EnR	Log_PI	Part EnR	PENhab	Part EnR	Log-EGES	Part EnR	TU	Part EnR	Dens	Part EnR	SPE	Part EnR
	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
	Part EnR	Log_Pib	Part EnR	TCPibhab	Part EnR	Log_DRD	Part EnR	Log_PI	Part EnR	PENhab	Part EnR	Log-EGES	Part EnR	TU	Part EnR	Dens	Part EnR	SPE
Alsace	0.17	0.30	1.09	0.33	1.09	3.66**	3.82**	5.33***	0.03	0.12	0.68	0.02	1.70	2.06	0.25	2.53	0.07	0.22
Aquitaine	0.06	0.63	1.03	0.56	0.32	3.28	2.78**	3.91	1.61	1.50	2.45	0.12	0.97	0.03	11.16***	0.62	7.35***	0.32
Auvergne	3.75**	0.13	2.25	0.11	0.13	4.14**	2.73*	0.75			0.04	2.42	0.18	0.004	7.98***	2.04	2.86*	2.78*
B-Normandie	7.68***	4.55**	0.03	4.53**	9.31***	0.20	5.31**	0.27	6.59***	7.22***	0.79	0.94	0.23	0.56	0.48	1.97	0.002	4.28**
Bourgogne	0.19	5.78***	0.48	4.9**	0.98	16.5**	1.21	0.44			0.89	1.06	0.11	0.35	5.34**	2.72*	0.04	1.25
Bretagne	6.61***	0.53	0.90	0.67	0.92	0.32	0.47	1.20			2.26	0.17	2.75*	1.66	16.04***	1.12	0.85	0.11
Centre	0.004	2.20	0.56	2.12	2.45	0.74	1.29	0.01	0.58	0.63	4.42**	3.03*	1.17	0.91	12.02***	0.05	3.79**	1.29
C-Ardenne	5.36**	0.05	8.61***	0.008	1.85	0.01	1.14	5.10**	0.25	0.08	2.0	5.8***	0.23	22.3***	0.11	0.03	0.87	0.07
Corse	0.53	0.10	2.46	0.04	1.25	1.3	2.16	2.01			0.55	0.15	0.28	0.48	0.52	0.03	13.12***	5.51***
DOM	0.33	0.001	20.73***	0.0003	1.96	7.45***	0.04	4.96**			7.63***	3.48**	0.23	16.24***	0.0007	18.2***	3.32*	1.10
F-Comté	12.55***	0.91	6.12	0.54	9.39***	13.08***	5.08**	1.51			0.007	0.06	0.26	1.29	1.28	7.36***	0.19	5.09*
H-Normandie	0.23	6.37***	14.5***	6.80***	0.00337	2.69	0.21	10.1***	1.46	4.8**	0.011	0.21	1.86	11.1***	0.77	4.6**	9.62***	2.49
Ile-de-France	1.68***	1.07	16.37***	1.23	7.65	0.04	0.64	0.12			1.77	6.9***	0.63	8.04***	0.31	4.44***	4.42**	0.79
L-Roussillon	1.04	0.05	0.31	0.06	1.40	1.41	0.05	0.42			0.003	13.7	0.15	2.47	11.74***	2.14	0.21	3.8**
Limousin	0.27	4.23**	0.16	4.35**	1.75	4.36**	3.16*	5.69***			0.11	0.07	11.02***	0.98	1.14	0.19	2.37	1.41
Lorraine	0.69	0.44	0.17	0.59	1.55	19.15***	0.09	0.42	0.90	0.69	0.63	0.35	0.38	3.27*	0.22	0.04	0.19	0.21
M-Pyrénées	4.71**	0.12	0.03	0.10	6.78***	0.04	0.06	1.88	0.03	0.49	1.47	3.48**	0.26	4.79**	0.05	1.43	6.21***	5.39**
NPDC	0.29	6.27***	16.34***	5.62***	0.02	2.37	0.68	1.57	1.64	0.97	0.75	0.79	1.64	21.1***	0.001	62.06***	7.73***	0.05
PDLL	3.83**	1.59	0.72	1.51	0.18	1.44	0.004	1.51			0.14	0.0003	0.025	8.69***	10.19***	0.49	0.31	3.66*
Picardie	4.19**	1.40	2.20	1.51	2.51	3.24*	24.87***	0.21			0.42	9.68***	8.17***	0.13	0.84	9.73***	3.76**	4.79***
P-Charentes	23.4***	7.87***	0.59	8.65***	4.61**	0.52	5.36**	5.92***	13.06***	0.87	0.15	0.37	0.006	2.44	27.73***	0.55	9.49***	0.02
PACA	1.14	0.01	0.70	0.02	0.0009	9.55***	0.01	1.7e-05			0.08	3.18*	0.01	0.69	1.57	0.27	3.45*	9.66***
R-Alpes	2.26	0.41	0.13	0.28	0.84	6.59***	0.07	0.52	0.05	0.63	0.0005	4.81***	1.15	0.36	1.01	1.20	0.99	0.89

b) Tests de causalité en Panel

**Tableau 24** : Test de causalité en panel

variables	Direction de causalité		Z-bar	Z-bar tilde	
<b>Log_Pib et Part EnR</b>	Log_Pib	➡	Part EnR	9.08 ***	7.36***
	Part EnR	➡	Log_Pib	0.62	0.24
<b>TCPibhab et Part EnR</b>	TCPibhab	➡	Part EnR	9.57***	7.77***
	Part EnR	➡	TCPibhab	1.44	0.92
<b>Log_DRD et Part EnR</b>	Log_DRD	➡	Part EnR	9.28***	7.53***
	Part EnR	➡	Log_DRD	0.70	0.30
<b>Log_PI et Part EnR</b>	Log_PI	➡	Part EnR	4.75**	3.71**
	Part EnR	➡	Log_PI	0.57	0.77
<b>PENhab et Part EnR</b>	PENhab	➡	Part EnR		
	Part EnR	➡	PENhab		
<b>Log-EGES et Part EnR</b>	Log-EGES	➡	Part EnR	1.0043	0.55
	Part EnR	➡	Log-EGES	0.57	0.76
<b>TU et Part EnR</b>	TU	➡	Part EnR	0.14	0.16
	Part EnR	➡	TU	1.009	0.56
<b>Dens et Part EnR</b>	Dens	➡	Part EnR	14.93***	12.28***
	Part EnR	➡	Dens	3.13	2.34
<b>SPE et Part EnR</b>	SPE	➡	Part EnR	3.87***	2.97***
	Part EnR	➡	SPE	0.53	0.17

\*\*, \*\*\*Le rejet de l'hypothèse nulle de non-causalité au niveau de respectivement 5 % et 1 %.

La confirmation de la cointégration entre les variables de l'étude suggère qu'il devrait exister une causalité unilatérale ou bidirectionnelle entre les variables sous-jacentes de l'étude. Comme la dépendance transversale existe dans nos données de panel, nous utilisons le test de causalité de Dumitrescu et Hurlin (2012) pour explorer les chemins des relations entre les variables. Ce test utilise une structure vectorielle autorégressive pour trouver l'hétérogénéité non observée des données stationnaires et une technique de régression pour chaque section transversale du panel pour identifier les liens de causalité entre les variables de l'étude.

Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 24 ci-dessus confirment l'existence d'une causalité unidirectionnelle allant du niveau de développement économique (Log\_Pib), le niveau de croissance économique (TCPibhab), le volume des dépenses en recherche et développement (Log\_DRD), la production industrielle (Log\_PI), la densité de la population (Dens) et le score des partis écologistes (SPE) vers la consommation des EnR (Part EnR). En

revanche, aucune relation de rétroaction ou causalité bidirectionnelle n'a été détectée entre les variables explicatives et la variable endogène.

## **Conclusion**

Tout au long de ce chapitre, nous avons cherché à identifier les déterminants de la consommation des EnR dans les régions françaises au cours de la période 1990-2015. Nous avons montré à travers l'estimation d'un modèle VECM, qu'à court terme, la croissance économique à la période passée mesurée par le taux de croissance du PIB réel affecte positivement la consommation des EnR, alors que les productions nucléaire et industrielle par habitant ont un impact négatif. Il semble qu'à court terme, l'énergie nucléaire constitue un frein à la promotion des EnR.

A long terme, les estimations des modèles FM-OLS et DOLS indiquent que le niveau de développement de l'économie, mesurée par le log du PIB par habitant impacte positivement la part d'EnR dans la consommation finale d'énergie. Les résultats montrent également que les dépenses en recherche et développement favorisent le recours aux énergies renouvelables qui dépendent en grande partie de la densité de la population. Enfin, nous montrons qu'à l'échelle régionale, le poids des partis « verts » influence positivement l'essor des EnR.

Le processus de transition vers les EnR est ainsi, un processus complexe lié à des caractéristiques régionales de natures différentes : économique (PIB par habitant), institutionnelle ou politique (score des partis écologistes), démographique (densité de la population) et technologique (dépenses en R&D par habitant). Nos résultats permettent d'identifier certains leviers favorables au déploiement des EnR et de préconiser le renforcement des mesures de soutien aux EnR avec l'appui des régions et des grandes entreprises. Il faudrait accroître les investissements des entreprises dans le domaine des EnR en leur apportant un soutien financier accru. En ce sens, le "prêt vert" à des taux d'intérêt bas peut être une solution. En outre, les activités de recherche et de développement devraient être développées en concertation avec les stratégies de promotion des EnR dans le sens où les effets d'apprentissage et d'expérience diminuent les coûts et accélèrent le processus de diffusion des EnR. Il est également recommandé que les incitations ne prennent pas uniquement la forme de capital physique, mais également de capital humain, puisque la densité de la population affecte positivement la consommation des EnR d'où la nécessité de



disposer d'un personnel qualifié dans le domaine et d'assurer la participation du public dans le processus de diffusion des EnR.

Nous avons également constaté que la consommation des EnR dépend également du score des partis écologistes dans les élections régionales. Cet indicateur reflète l'orientation politique de la région aux préoccupations environnementales et traduit le degré de mobilisation des citoyens dans le champ écologique. En effet, La participation citoyenne aux négociations et aux débats publics concernant la question environnementale est au cœur des mutations qu'a connues l'action publique. Dans ce cadre, les acteurs de la société civile jouent un rôle essentiel dans la sensibilisation croissante des citoyens aux préoccupations environnementales. En effet, la consommation énergétique varie selon les caractéristiques sociales, démographiques et économiques des citoyens (ménages et individus). Ils sont directement responsables à leur niveau de la préservation de l'environnement (Agger, 2010). Il est donc nécessaire de les associer à travers une finance solidaire à l'effort de transition énergétique en les engageant financièrement à acheter des parts Énergie Partagée et rejoindre les dynamiques de projets domestiques. La promotion des EnR dépend donc dans une large mesure des politiques volontaristes et des mécanismes institutionnels adéquats qui seront mis en œuvre par chaque région financer le développement de projets d'énergie renouvelable d'intérêt territorial

L'étude des déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale est constructive dans le sens où elle contribue à la littérature existante sur les déterminants de la consommation des EnR, qui jusqu'à présent s'est focalisée sur des travaux à l'échelle des pays. Ce travail constitue une première étape pour pallier le manque d'études à l'échelle régionale. Néanmoins, la construction d'un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la consommation pour chaque source d'EnR pourrait fournir des réponses différentes en comparaison avec l'analyse agrégée dans la mesure où les différentes filières d'EnR sont fortement liées aux ressources naturelles locales (soleil, bois, vent, cours d'eau...). Par conséquent, l'introduction des variables climatiques et géographiques dans ces modèles pourrait expliquer en grande partie des niveaux de consommation d'EnR contrastés entre les régions.

## Conclusion générale

Le développement des EnR se trouve au cœur du débat actuel sur l'avenir de l'approvisionnement en énergie et de la réussite de la transition énergétique. Leur promotion et leur soutien doivent être suffisamment renforcés au cours de cette décennie pour que ce développement reste dynamique, performant et intégré. Au niveau international la prise de conscience du réchauffement climatique et de la nécessaire protection de l'environnement ont favorisé les initiatives de développement des EnR. Sur le plan de l'Union Européenne, les Etats membres cherchent, à bâtir une véritable "Union de l'énergie" dont la principale dimension est le renforcement des actions pour le climat et la décarbonisation de l'économie. Naturellement, les Etats membres individuellement viennent compléter l'action européenne. La France par exemple a voté en 2015 une loi de transition énergétique, puis un plan climat en 2017. En effet, la France est tenue au sein de l'Union Européenne à des objectifs précis à atteindre dans un premier temps en 2020 pour évaluer les capacités du territoire, puis sur une plus grande échelle avec de nouveaux objectifs fixés pour 2030.

Dans ce débat sur l'avenir de l'approvisionnement énergétique, il ne s'agit pas seulement de la contribution des EnR à la transition énergétique; mais de la question des rôles que pourraient jouer les collectivités locales, notamment les régions. En effet, la réalisation des objectifs fixés aux échelles nationale et européenne ne peut être accomplie sans une participation active des collectivités territoriales et de l'ensemble de leurs compétences. Les deux lois « Grenelle » (loi n° 2009-967 du 3 août 2009 et loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010) ont conféré aux collectivités territoriales un rôle majeur dans la mise en place de la transition énergétique en étendant leur champ de compétences dans le domaine de la politique énergétique, en leur permettant de développer des actions en faveur de la maîtrise de l'énergie et d'intervenir dans le domaine de la production des sources d'EnR.

L'objectif principal de cette thèse consistait à étudier la territorialisation de la production d'EnR selon ses différentes origines (biomasse, solaire, géothermie, éolien et hydraulique). Nous avons cherché à évaluer les performances des régions en matière de diversification du bouquet énergétique en 2015 et sur la période 1990-2015 et étudier les déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale dans le but d'identifier les principaux leviers favorisant leur déploiement. Les travaux portant sur les EnR se multiplient constituant un important champ de recherche. Cependant, la plupart des études se sont focalisées sur des comparaisons entre pays; les travaux portant sur les régions sont plus limités ou presque

inexistants. L'objet de cette thèse est justement de remédier à ce manque en proposant une contribution portant sur les régions françaises. En effet, l'analyse des performances régionales en termes de diversification du bouquet énergétique et l'étude des déterminants de la consommation des EnR à l'échelle régionale sont constructives dans le sens où elles contribuent à la littérature existante sur le développement des EnR à l'échelle locale.

La méthodologie suivie consistait dans un premier temps à faire une analyse bibliographique exhaustive permettant de consolider les connaissances sur la question du développement des EnR. Pour comprendre le développement territorial des énergies renouvelables, nous avons commencé par une analyse comparée des bilans énergétiques des régions (production et consommation) et de leur dépendance énergétique. Cette comparaison a permis de mieux comprendre les spécificités régionales de développement des EnR. Pour mener cette analyse, nous nous sommes focalisés principalement sur la décomposition des EnR fournie par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et du Service de l'Observation et des statistiques (SOeS)

Nous avons cherché ensuite à identifier les facteurs susceptibles d'expliquer le développement régional des énergies renouvelables ainsi que les différences constatées entre les régions. Nous avons envisagé aussi bien des facteurs liés aux spécificités régionales relatives aux consommations d'énergie, aux émissions de CO<sub>2</sub>, aux caractéristiques socio-économiques, que des facteurs liés directement à l'action des pouvoirs publics. Partant de l'hypothèse que les régions bénéficiaires de conditions climatiques favorables et les plus innovantes sont plus propices au développement de nouvelles sources d'énergie, nous avons également identifié des spécificités territoriales liées au climat, à la proximité des cours d'eau, des forêts... et des spécificités relatives à la maîtrise de la technologie qui favorisent le développement de certaines EnR plutôt que d'autres dans l'objectif de distinguer les régions présentant un potentiel naturel favorable au développement des capacités productives d'électricité et de chaleur à partir des EnR.

Cette thèse a été structurée autour de quatre chapitres. Nous avons commencé dans le chapitre introductif, par l'explication des raisons et des faits qui font du développement des EnR un chemin inévitable. Puis, nous avons fourni les principaux éléments d'un cadre analytique des politiques d'incitation en faveur des nouvelles technologies d'EnR. Dans le chapitre suivant, nous nous sommes intéressés au développement territorial des EnR en France.

L'objectif était de réaliser un état des lieux de la transition énergétique en France et plus précisément d'évaluer les performances des régions en matière de diversification de leur bouquet énergétique. Nous avons fourni pour l'année 2015 une typologie des régions françaises en termes de diversification du bouquet énergétique en considérant des données relatives aux bilans énergétiques des régions (production et consommation par type d'énergie). La classification Ascendante Hiérarchique (CAH) établie nous a permis de dégager les constatations suivantes :

- Les régions affichent de fortes spécificités régionales et des performances contrastées en matière de développement des EnR. Nous avons relevé cinq profils types de régions ;
- Dans les trois premières classes, le développement des EnR accuse un retard considérable par rapport aux objectifs fixés dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) à l'horizon 2020.
  - Dans la classe EnR1, constituée de la région Ile de France, la production d'électricité primaire par habitant est faible et est majoritairement assurée par la biomasse et le thermique.
  - La classe EnR2 regroupe des régions fortement productrices d'électricité primaire essentiellement d'origine nucléaire. La production d'électricité d'origine renouvelable est très peu développée et s'oriente principalement vers l'éolien.
  - La classe EnR3 enregistre un retard important dans le déploiement des EnR, l'éolien se place également en première position suivi du photovoltaïque dans la production d'électricité renouvelable.
- Les deux classes EnR4 et EnR5 respectaient en 2015 les objectifs à atteindre à l'horizon de 2020 dans le cadre des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) établis en 2012.
  - Les bonnes performances de la classe EnR4 sont en particulier liés au déploiement des EnR dans le transport et le chauffage ;
  - La classe EnR5 est caractérisée par l'importance de la filière hydraulique sur des territoires constitués de régions montagneuses.

Deux types d'analyse ont été ensuite appliquées afin d'explorer les liens rétroactifs entre la partition des régions d'EnR réalisée et les variables thématiques considérées (environnement, démographie, développement économique, spécialisation sectorielle, climat et géographie, politique). La première est bivariable (l'analyse de la variance (ANOVA)), alors que la seconde est multidimensionnelle (l'analyse discriminante (AD)). De ces analyses, nous déduisons les résultats suivants :

- Les processus à l'œuvre à l'échelle régionale diffèrent de ceux qui prévalent au niveau national ;
- Le poids des partis écologistes ainsi que l'importance des émissions de GES ne se traduisent pas par un développement soutenu des nouvelles filières d'EnR ;
- Le déploiement des EnR ne semble pas plus dynamique dans les régions à forte croissance économique, notamment, la région Ile de France ;
- Les variables géographiques, point culminant et cours d'eau conditionnent fortement le déploiement territorial des EnR : l'hydraulique s'est développé dans les régions montagneuses alors que le nucléaire a été favorisé dans les régions bénéficiant de ressources en eau importantes ;
- Les filières énergétiques renouvelables éolienne et photovoltaïque se développent de manière indifférenciée sur tout le territoire français indépendamment des variables climatiques, en particulier la vitesse moyenne du vent, la température et l'ensoleillement.

Pour mieux appréhender les efforts régionaux en termes de promotion des EnR, nous avons adopté une approche dynamique dans le chapitre 2. Pour ce faire, nous étudions le développement régional des EnR sur la période 1990-2015. Nous avons utilisé des méthodes d'analyse des données dynamiques, permettant de prendre en compte la dimension temporelle qui s'avère cruciale en matière d'énergie en raison de l'existence de délais importants entre la décision d'investir dans des équipements, la mise en place de ces équipements et la production d'énergie. La classification des années établie met en évidence quatre sous-périodes de développement des EnR. La première s'étale sur quatre ans (1990-1994) et se caractérise par une forte dépendance aux énergies hydraulique et thermique. Au cours de la seconde période (1995 - 2003), le bouquet énergétique est encore peu diversifié se basant sur les combustibles fossiles, les énergies hydraulique et thermique avec l'émergence de l'énergie biomasse. La troisième période s'étend de 2004 à 2011 et se distingue par le développement

des deux nouvelles filières d'ENR, à savoir les énergies éolienne et photovoltaïque. Et finalement, sur la dernière sous-période (2012 à 2015), on assiste à la diversification des ENR. En effet, à côté de la production d'électricité, les réseaux de chaleur et de transport renouvelables sont en plein essor au cours de cette dernière période.

Dans un second temps, nous avons réalisé une classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur chaque sous-période afin de : i) mettre en évidence les similitudes et les dissemblances entre régions en termes de diversification du bouquet énergétique relativement aux bilans énergétiques des régions ; ii) d'étudier la dynamique du développement des EnR dans les régions sur les différentes quatre sous-périodes identifiées.

Nous avons mis en évidence cinq types distincts de profils de développement des EnR sur les quatre sous-périodes. Nous pouvons établir le constat suivant :

- À l'exception de l'Auvergne, l'Aquitaine, la Bourgogne, la Franche-Comté, Poitou-Charentes, et la Lorraine qui ont connu des trajectoires plus contrastées en termes de développement des EnR, les 16 autres régions ont suivi un parcours similaire sur la période 1990-2015.
- Les régions où la situation initiale était favorable en termes de part consommée des EnR ont renforcé cette situation, tandis que d'autres n'ont pas réussi à combler leur retard.

A noter que malgré des voies différentes, les performances des régions françaises dans le développement des énergies renouvelables sont conformes à la politique nationale, puisqu'en 2015, la moitié des régions ont déjà dépassé l'objectif de 20% des EnR dans la consommation finale d'énergie à atteindre dans le cadre du SRCAE. Ces efforts inégalement répartis devraient cependant permettre à la France d'atteindre l'objectif fixé à 23 % par la loi de transition énergétique pour la croissance verte pour 2020 puisque les EnR représentaient déjà 15,2 % de la consommation finale d'énergie en 2015. Cependant, il est souhaitable de répartir équitablement les efforts de développement nouvelles filières d'EnR entre les régions. En effet, dans la mesure où le potentiel hydroélectrique de la France est déjà bien exploité, les initiatives de développement des EnR doivent être orientées principalement vers les autres filières.

Ces résultats nous ont permis de suivre de manière descriptive l'évolution régionale des EnR sur la période 1990-2015, sans comprendre les raisons derrière ces disparités. Nous

avons cherché tout au long du troisième chapitre à identifier ces facteurs. Nous avons donc construit un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la part des EnR dans la consommation finale d'énergie au niveau régional sur la période 1990-2015. La double dimension individuelle et temporelle en données de panel permet de contrôler la présence d'hétérogénéité inobservable et d'améliorer la précision des estimations. Nous avons proposé une analyse d'intégration-cointégration sur panel, en utilisant les méthodes des moindres carrés complètement modifiés (FMOLS) et des moindres carrés dynamiques (DOLS) pour estimer les effets de long terme. La présence d'une relation de cointégration a permis de recourir à une représentation VECM. Nous avons adopté l'approche d'Apergis et al. (2010) afin d'analyser les relations de court terme entre les séries temporelles régionales.

Nous avons montré à travers l'estimation d'un modèle VECM, qu'à court terme, la croissance économique à la période passée mesurée par le taux de croissance du PIB réel affecte positivement la consommation des EnR, alors que les productions nucléaire et industrielle par habitant ont un impact négatif. Il semble qu'à court terme, l'énergie nucléaire constitue un frein à la promotion des EnR.

A long terme, les estimations des modèles FM-OLS et DOLS indiquent que le niveau de développement de l'économie, mesurée par le logarithme du PIB par habitant impacte positivement la part d'EnR dans la consommation finale d'énergie. Les résultats montrent également que les dépenses en recherche et développement favorisent le recours aux énergies renouvelables qui dépendent en grande partie de la densité de la population. Enfin, nous montrons qu'à l'échelle régionale, le poids des partis « verts » influence positivement l'essor des EnR.

Nos résultats permettent d'identifier certains leviers favorables au déploiement des EnR. En effet, le développement des EnR dépend des facteurs de type économique (PIB par habitant) et technologique (dépenses en R&D par habitant). En effet, l'essor des nouvelles filières d'EnR (l'éolien et le solaire) reste largement tributaire de contraintes techniques et économiques : l'intermittence et le coût. Ces énergies n'ont par définition aucune limite de gisement mais elles présentent des limites d'exploitation, notamment une production intermittente liée aux facteurs météorologiques. Une forte proportion d'énergies intermittentes nécessitera d'importantes adaptations du système électrique, qui doit en permanence équilibrer l'énergie produite et celle demandée par les consommateurs, en maintenant la fréquence et la tension dans un intervalle étroit. Apporter des solutions techniques aux contraintes liées au

réseau et au stockage est donc essentiel pour assurer le développement des énergies renouvelables ; certaines pistes sont déjà envisagées : installations de stations de pompage en mer, stockage de l'énergie sous forme de méthane obtenu par synthèse à partir du CO<sub>2</sub>, introduction de l'intelligence dans les réseaux (smart grids) afin de mieux concilier, de manière dynamique, la demande et l'offre... Le coût résultant sera-t-il acceptable ? Des investissements considérables seront nécessaires : l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) considère qu'un quart de l'investissement dans les réseaux de transport d'ici à 2035 sera lié à la croissance de la production d'électricité d'origine renouvelable. Par ailleurs, l'essor actuel des ??? nouvelles EnR repose en grande partie sur des aides ou subventions indirectes comme celle de l'obligation de rachat de l'électricité à des tarifs nettement supérieurs au prix à la production du marché, la percée des énergies renouvelables ne pourra se réaliser que si les coûts d'une majorité de ces énergies, notamment ceux du solaire électrique, baissent fortement. Ceci n'est envisageable que si les progrès technologiques initiés par la R&D s'accélèrent.

Plus les technologies sont à un stade précoce de développement, plus les verrous sont d'ordre technologique, alors que lorsque les technologies sont au stade du déploiement commercial, les verrous peuvent être davantage d'ordre technico-économique. Leur levée nécessite des actions de R&D, des aides ciblées (fonds démonstrateurs) et des aides transverses (crédit d'impôt recherche par exemple). Ce soutien a vocation à lever ces obstacles et à assurer l'atteinte des objectifs nationaux en termes de pénétration des EnR dans le mix énergétique. (Leclercq et al., 2014).

Les outils de soutien public sont nécessaires au déploiement des énergies renouvelables compte tenu du coût encore supérieur au prix de marché des EnR, leur déploiement ne pourrait pas se faire sur le seul critère de compétitivité dans un fonctionnement de marché. Les mécanismes incitatifs mis en place sont spécifiques à chaque filière et doivent faire l'objet d'adaptations périodiques pour tenir compte des évolutions techniques et économiques dans la mesure où elles peuvent conduire à des distorsions de concurrence entre les filières énergétiques. En effet, la Cour des comptes (2018) a souligné un déséquilibre du soutien financier qui bénéficie essentiellement aux énergies renouvelables électriques, au détriment de leurs homologues thermiques.

Nous avons également montré que la consommation des EnR dépend également des facteurs de type institutionnel (score des partis écologistes) et démographique (densité de la



population). Le score des partis écologistes traduit l'implication des citoyens dans la prise de décision en matière d'environnement, qui est à la fois complexe et aux enjeux énormes. La détermination des besoins énergétiques doit se faire en menant une concertation locale associant tous les acteurs territoriaux, notamment les citoyens, qui par leurs modes de consommations énergétiques agissent fortement sur le déploiement des EnR. D'autre part, l'impact relevé de la densité de la population sur le développement des EnR traduit la nécessité de penser l'articulation entre la dimension territoriale et la dimension environnementale. La densité de population est une donnée importante pour le développement des EnR puisqu'elle donne une idée de la disponibilité de territoire, les solutions énergétiques diffèrent ainsi selon son degré d'occupation.

Nous proposons plusieurs préconisations de manière à favoriser le développement régional des EnR pour réduire l'empreinte carbone de la France et accroître son efficacité énergétique. Premièrement, il apparaît nécessaire de mieux cibler les politiques et les dépenses publiques afin de garantir une allocation durable et efficiente des ressources énergétiques : i) en favorisant l'utilisation des EnR dans les transports et le chauffage car les émissions de GES continuent à croître dans les secteurs des transports et du résidentiel tertiaire, les efforts devront être particulièrement soutenus dans les régions fortement urbanisées, ii) en valorisant le potentiel énergétique de chaque région et en concentrant les subventions sur des filières ayant un avantage « climatique » comparatif, il serait souhaitable que des objectifs régionaux spécifiques soient définis au niveau national pour les nouvelles filières d'EnR en fonction des caractéristiques géographiques et climatiques, iii) en assurant une meilleure coordination des politiques régionales, nationales et européennes, les réseaux électriques étant interconnectés au niveau européen, la mise en place d'une politique européenne de l'énergie permettrait de mieux gérer l'intermittence des nouvelles EnR et accroîtrait l'efficacité énergétique.

Deuxièmement, il semble nécessaire que le pilotage de la transition énergétique soit réalisé au niveau national voire européen pour assurer une cohérence globale, les financements et dispositifs publics de soutien doivent s'inscrire dans la durée de manière à offrir un cadre clair et lisible favorisant les investissements. Enfin, bien qu'acteurs incontournables de la transition énergétique, les collectivités territoriales n'ont pas été dotées de moyens supplémentaires pour assurer leur mission, l'attribution aux régions de moyens dédiés au développement des EnR

pourrait accélérer le développement des EnR sur les territoires et permettre d'atteindre les objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

Enfin, comme tout travail de recherche, cette thèse comporte des limites. En effet, par manque de données, nous n'avons pas intégré dans nos analyses, des variables relatives aux coûts de production par filière et à la structuration des dispositifs de soutien public. Les différences régionales pourraient fournir des réponses différentes en termes de développement des EnR. Il est à noter qu'une telle étude approfondie nécessite des données qui ne sont pas disponibles.

Finalement, la construction d'un modèle économétrique explicatif de l'évolution de la consommation pour chaque source d'EnR pourrait fournir des informations additionnelles intéressantes dans la mesure où les différentes filières d'EnR sont fortement liées aux ressources naturelles locales (bois, cours d'eau...). Par conséquent, l'introduction des variables géographiques dans ces modèles pourrait expliquer en grande partie des niveaux de consommation d'EnR contrastés entre les régions.

## Annexes

**Tableau A1 : Variables thématiques**

Identificateur	Description de la variable	Source
<b>Les variables environnementales</b>		
EGES.hab	Les émissions de gaz à effet de serre (tonnes/hab)	DREAL
CN	Centrales nucléaires (nombre)	Inventaire ANDRA
MT.ICA.hab	Montant des investissements spécifiques pour lutter contre la pollution de l'air et le climat (euros/hab)	Enquête ANTIPOL
D.Invest	Les dépenses d'investissement régionales pour l'environnement (euros/hab)	DGCL
D.Fonct	Les dépenses de fonctionnement régionales pour l'environnement (euros/hab)	DGCL
<b>Les variables démographiques</b>		
Pop	La population (nombre)	INSEE
Dens	La densité de la population (hab/km <sup>2</sup> )	INED
TU	Le taux d'urbanisation (%)	INSEE
%P.0-19	Part de la population âgée de 0 à 19 ans dans la population totale (%)	INSEE
%P.20-39	Part de la population âgée de 20 à 39ans dans la population totale (%)	INSEE
%P.40-59	Part de la population âgée de 40 à 59ans dans la population totale (%)	INSEE
%P.60+	Part de la population âgée 60 ans et plus dans la population totale (%)	INSEE
Part.dip	La part des diplômés dans la population (%)	INSEE
<b>Les variables relatives aux performances économiques</b>		
Pib.val.hab	Le PIB par habitant en valeur (euros/hab)	INSEE
TC.Pib.hab	Le taux de croissance du PIB par habitant (%)	INSEE
R.hab.val	Le revenu par habitant en valeur (euros/hab)	INSEE
Tx.C	Le taux de chômage (%)	INSEE
Inv.hab	L'investissement (euros/hab)	DGCL
BR.hab	Le budget de la région (euros/hab)	DGCL
DE.hab	Les dépenses pour l'éducation par habitant (euros/hab)	DGCL
DS.hab	Les dépenses pour la santé par habitant (euros/hab)	DGCL
D.R&D.hab	Les dépenses en R&D par habitant (euros/hab)	Eurostat
PI.hab	La production industrielle par habitant (M€/hab)	INSEE
<b>Les variables relatives à la spécialisation sectorielle</b>		
Agr.VA	La part de l'agriculture dans la VA (%)	INSEE
Ser.VA	La part des services dans la VA (%)	INSEE
Ind.VA	La part de l'industrie dans la VA (%)	INSEE
VA.DABT.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la fabrication de denrées alimentaires, de boissons et de produits à base de tabac dans la valeur ajoutée industrielle (%)	INSEE
VA.CR.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la cokéfaction et du raffinage dans la valeur ajoutée industrielle (%)	INSEE

VA.EEIM.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la fabrication d'équipements électriques et informatiques et de machines dans la valeur ajoutée industrielle (%)	INSEE
VA.IEEED.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans les secteurs de la construction et de l'industrie extractive, l'énergie, l'eau, la gestion des déchets et de la dépollution dans la valeur ajoutée industrielle(%)	INSEE
VA.MT.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans le secteur de la fabrication de matériels de transport dans la valeur ajoutée industrielle (%)	INSEE
VA.API.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans le secteur de la fabrication d'autres produits industriels (fabrication de textile, Industrie de papier, Industrie chimique et pharmaceutique, fabrication de produits métalliques, en caoutchouc et en plastique) dans la valeur ajoutée industrielle (%)	INSEE
VA.CON.S.VAI	La part de la valeur ajoutée brute dans le secteur de la construction dans la valeur ajoutée industrielle(%)	INSEE
ESA.ET	L'emploi dans le secteur agricole en % de l'emploi total	INSEE
ESI.ET	L'emploi dans le secteur industriel en % de l'emploi total	INSEE
ESS.ET	L'emploi dans le secteur des services en % de l'emploi total	INSEE
<b>Les variables climatiques et géographiques</b>		
TC	Type de climat (montagnard, continental, océanique, tempéré, méditerranéen ou maritime tropical (DOM))	Météo-France
Sup	Superficie (ha)	INSEE
Temp	Température (°C)	Météo-France
Enso	Ensoleillement (heures)	Météo-France
Vent	Vitesse du Vent (Km/h)	Météo-France
Pluie	Pluie (mm)	Météo-France
F.M	Façade maritime (ha)	MEEM
C.Eau	Cours d'eau (Km <sup>2</sup> )	BRGM
Sup.forêt	Superficie des forêts (ha)	IGN
P.Culm	Point culminant (m)	BRGM
<b>Les variables politiques</b>		
CP	La couleur politique du conseil régional élu (gauche, droite ou régionalistes)	
SPE	Le score des partis écologistes aux élections régionales de 2015 (% des voix)	Ministère de l'Intérieur
Obj.SRCAE	La part de la production d'EnR dans la consommation finale d'énergie visée en 2020 par le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE) (%)	SOeS

**Tableau A2:** Synthèse de la partition en 5 classes des 22 régions françaises selon le développement des EnR en France en 2015

Description		<b>Classe EnR1 :</b> <i>Prédominance de la biomasse et du thermique dans la production d'électricité renouvelable</i>	<b>Classe EnR2 :</b> <i>Domination du nucléaire et émergence de l'éolien</i>	<b>Classe EnR3 :</b> <i>Retard dans le déploiement des EnR et choix de l'éolien</i>	<b>Classe EnR4 :</b> <i>Forte consommation d'EnR dans le transport et le chauffage</i>	<b>Classe EnR5:</b> <i>Forte production d'électricité renouvelable et prépondérance de l'hydraulique</i>
Effectif (%)		1 (4,55%)	3 (13,64%)	9 (40,91%)	2 (9,09%)	7 (31,82%)
<b>22 Régions Métropolitaines</b>		Ile-de-France	Centre Champagne-Ardenne Haute-Normandie	Aquitaine Basse-Normandie Bourgogne Bretagne Lorraine Nord-Pas-de-Calais Pays de la Loire Poitou-Charentes Picardie	Corse Limousin	Alsace Auvergne Franche-Comté Languedoc-Roussillon Midi-Pyrénées Prov. Alpes-Côte-d'Azur Rhône-Alpes
<b>Régions illustratives</b>		DOM				PFR
<b>Variables actives</b>	<b>Profil (+)</b>	+ Part.therm.PELRN + Part.biom.PELRN	+ PEN.hab + PTEM.hab + Part.eol.PENR	+ Part.phot.PENR + Part.eol.PENR + IE	+ Cons.CH.RN.hab + Cons.Bioc.hab + Part.ENR.CFTE	+ Part.hydr.PELRN + PELRN.hab + Part.ELRN.EPT
	<b>Anti-Profil (-)</b>	- IE - PTEM.hab - PEN.hab - CCF.hab	- Part.hydr.PELRN - Part.ELRN.EPT	- Part.ENR.CFTE - PELRN.hab - Part.hydr.PELRN	- CCF.hab	- Part.biom.PELRN - Part.eol.PENR
<b>Variables des thématiques illustratives</b>	<b>Environnement</b>		+ MT.ICA.hab + CN + EGES.hab + D.Invest - MT.ICA.hab			
	<b>Démographie</b>	+ Pop + Dens + TU + Part.dip			+ %P.60+ + %P.40-59  - %P.0-19	
	<b>Performances Economiques</b>	+ Pib.val.hab + R.hab.val	+ PI.hab  - TC.Pib.hab	- D.R&D.hab	+BR.hab +Inv.hab +DE.hab	+ D.R&D.hab  - DE.hab
	<b>Spécialisation sectorielle</b>	+Ser.VA +ESS.ET  - Agr.VA - Ind.VA	+ VA.CR.VAI + Ind.VA  - Ser.VA	+ ESA.ET + VA.DABT.VAI	+ VA.CONS.VAI + VA.IEEED.VAI  - VA.API.VAI	- Agr.VA - ESA.ET
	<b>Climat &amp; géographie</b>			+ TC-Continental  - P.Culm - Enso	+ Vent +Enso +Temp  -C.Eau	+ P.Culm + Sup.forêt + Enso + F.M
	<b>Politique</b>	+ SPE		- Obj.SRCAE	+ Obj.SRCAE  - SPE	

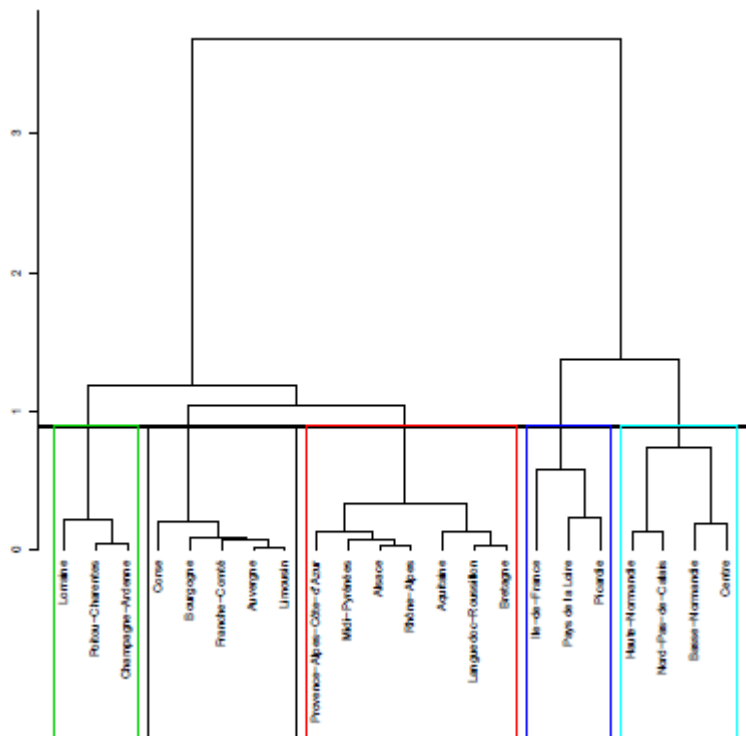
**Tableau A3: Effets du développement régional des EnR en France en 2015 sur les caractéristiques des thématiques**

		CLASSE EnR1	CLASSE EnR2	CLASSE EnR3	CLASSE EnR4	CLASSE EnR5	Ensemble								
EFFECTIF		1	3	9	2	7	22 régions								
THEMATIQUE	VARIABLES	Prédominance de labiomasse et du thermique dans la production d'électricité renouvelable					Domination du nucléaire et émergence de l'éolien		Retard dans le déploiement des EnR et choix de l'éolien		Forte consommation d'EnR Dans le transport et le chauffage		Forte production d'électricité renouvelable et prépondérance de l'hydraulique		
								Valeur F	Pr > F						
ENVIRONNEMENT	CN	0,000	7,333	2,111	0,000	2,571	1,63	0,2124							
	MT.ICA.hab	1,072	14,573	5,036	0,061	4,583	1,88	0,1600							
	D.Invest	12,812	33,681	23,349	22,633	27,734	1,61	0,2177							
	D.Fonct	25,631	29,126	24,564	22,183	24,137	0,45	0,7715							
	EGES.hab	0,004	0,011	0,009	0,009	0,007	1,88	0,1597							
DEMOGRAPHIE	Pop	12073,914 A <sup>(1)</sup>	1925,713 B	2627,671 B	530,178 B	3102,399 B	13,10	<b>0,0001**</b>							
	Dens	1001,000 A	89,000 B	116,000 B	40,000 B	117,000 B	40,06	<b>0,0001**</b>							
	TU	0,944 A	0,634 C	0,626 C	0,580 C	0,694 B	2,61	0,0721							
	Part.dip	0,463 A	0,268 B	0,289 B	0,306 B	0,330 B	5,90	<b>0,0036**</b>							
	%P.0-19	0,260 A	0,245 A	0,240 B	0,207 C	0,234 B	3,65	<b>0,0254*</b>							
	%P.20-39	0,284 A	0,229 B	0,226 B	0,218 B	0,232 B	4,05	<b>0,0174*</b>							
	%P.40-59	0,265	0,268	0,269	0,275	0,270	0,93	0,4706							
	%P.60+	0,192 C	0,258 B	0,265 A	0,299 A	0,264 A	3,15	<b>0,0416*</b>							
TC.Pib.hab	Pib.val.hab	54646,41 A	27639,83 B	26965,08 B	25596,28 B	28523,63 B	38,16	<b>0,0001*</b>							
	R.hab.val	24836,00 A	20101,67 B	19606,22 B	19933,50 B	19963,86 B	7,48	<b>0,0011*</b>							
	Tx.C	0,096	0,114	0,100	0,087	0,098	0,83	0,5250							
	Inv.hab	178,773 B	152,689 B	166,056 B	455,727 A	152,196 B	5,04	<b>0,0073**</b>							
PERFORMANCES ECONOMIQUES	BR.hab	410,501 B	442,329 B	439,512 B	1322,303 A	419,448 B	6,26	<b>0,0028**</b>							
	DE.hab	149,709 D	210,480 B	188,216 C	259,817 A	174,202 C	11,20	<b>0,0001**</b>							
	DS.hab	4,550	1,412	1,456	1,991	1,544	0,80	0,5409							
PI.hab	D.R&D.hab	947,843 A	403,884 B	436,813 B	245,413 C	825,367 B	5,49	<b>0,0050**</b>							
SPECIALISATION SECTORIELLE	Agr.VA	0,001	0,045	0,035	0,035	0,021	2,17	0,1167							
	Ser.VA	0,869 A	0,686 B	0,735 B	0,764 B	0,751 B	6,38	<b>0,0025*</b>							
	Ind.VA	0,130 C	0,268 A	0,230 A	0,201 B	0,228 A	3,87	<b>0,0206*</b>							
	VA.IIEED.VAI	0,170	0,116	0,108	0,156	0,115	1,92	0,1526							
	VA.DABT.VAI	0,056	0,144	0,158	0,118	0,110	1,49	0,2484							
	VA.CR.VAI	0,003	0,018	0,002	0,001	0,003	1,27	0,3213							
	VA.EEIM.VAI	0,084	0,073	0,066	0,063	0,080	0,24	0,9094							
	VA.MT.VAI	0,086	0,039	0,055	0,024	0,069	0,64	0,6427							
	VA.API.VAI	0,277	0,372	0,321	0,218	0,321	1,46	0,2588							
	VA.CON.S.VAI	0,322	0,237	0,291	0,420	0,303	1,96	0,1469							
	ESA.ET	0,001 C	0,014 B	0,016 A	0,014 B	0,008 B	3,35	<b>0,0340*</b>							
	ESS.ET	0,120	0,215	0,195	0,159	0,187	2,16	0,1173							
	ESS.ET	0,879 A	0,771 C	0,790 C	0,826 B	0,805 B	3,08	<b>0,0445*</b>							
	CLIMAT & GEOGRAPHIE	Sup	1206,415	2584,812	2584,604	1289,314	2864,263	1,11	0,3838						
Temp		12,710	11,750	12,490	14,640	13,266	1,73	0,1900							
Enso		1861,000 B	1882,000 B	1901,556 B	2507,000 A	2295,571 A	4,71	<b>0,0096**</b>							
Vent		93,200 C	100,800 B	105,411 B	138,050 A	113,300 B	2,94	<b>0,0511*</b>							
Pluie		503,000	593,333	698,556	687,500	719,429	1,65	0,2080							
F.M		0,000	4,000	2,889	20,000	85,571	1,02	0,4243							
C.Eau		24138,890	47078,297	39309,794	14180,485	35599,450	1,05	0,4102							
Sup.forêt		2620,000	6316,667	6147,778	5470,000	11170,000	1,44	0,2635							
P.C ulm		231,000 C	422,000 B	820,667 B	1841,50 A	2847,57 A	5,18	<b>0,0065**</b>							
TC (%)		Continental	100,00	33,33	88,89	0,00	28,57								
		Méditerranéen	0,00	0,00	0,00	50,00	14,29	<b>Khi-2</b>	<b>p-value</b>						
	Montagnard	0,00	33,33	0,00	0,00	28,57	20,981	0,1790							
	Océanique	0,00	33,33	11,11	0,00	0,00									
	Tempéré	0,00	0,00	0,00	50,00	28,57									
POLITIQUE	SPE	0,083	0,040	0,037	0,009	0,052	2,10	0,1260							
	Obj. SRCAE	0,230	0,297	0,234	0,390	0,288	1,57	0,2275							
	CP (%)	Droite	100,00	66,67	55,56	0,00	57,14	<b>Khi-2</b>	<b>p-value</b>						
	Gauche	0,00	33,33	44,44	50,00	42,86	12,089	0,1470							
	Régionaliste	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00									

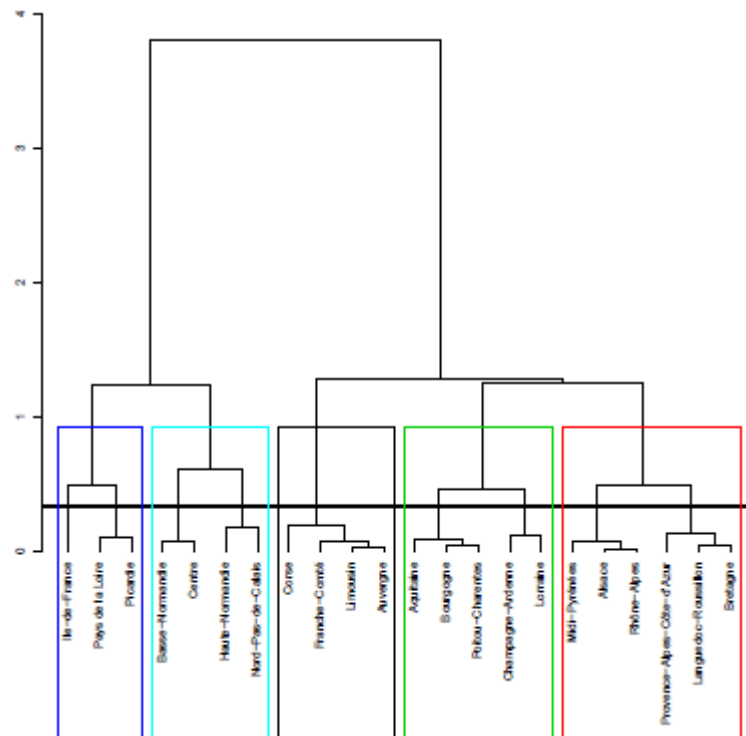
Seuil de significativité : \*\* < 1% , \* ]1% ; 5%]. Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes.

(1) Les lettres permettent de différencier les classes lorsque les moyennes sont significativement différentes. A correspond à la classe ayant la moyenne la plus, l'ordre alphabétique est utilisé pour désigner les moyennes par ordre décroissant.

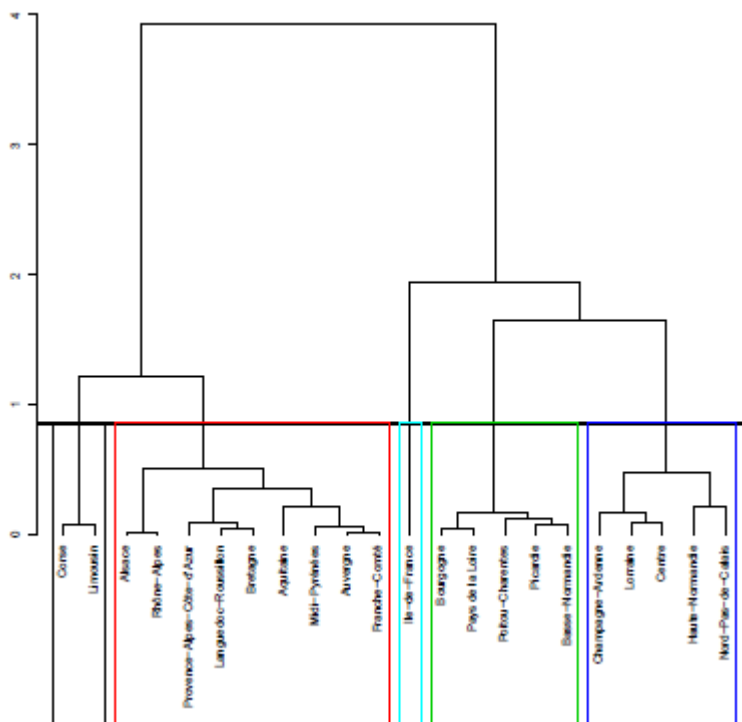
**Figure A4 :** Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR sur la période 1990-1994



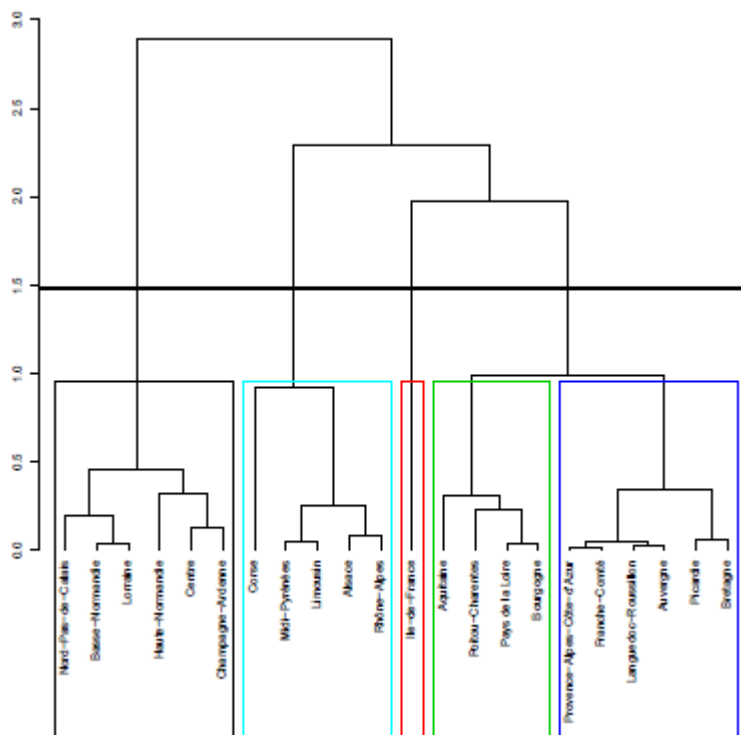
**Figure A5 :** Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR sur la période 1995-2003



**Figure A6 :** Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR sur la période 2004-2011



**Figure A7 :** Arbre hiérarchique des régions selon le développement des EnR sur la période 2012-2015





**Tableau A8:** Test de racine unitaire de Pesaran (2003)

<b>Variable</b>	<b>CADF</b>	
	<i>Variables en niveau</i>	<i>Variables en différence première</i>
<b>PART EnR</b>	-2.04*	-3.71***
<b>Log_Pib</b>	-2.46***	-3.13***
<b>TC_Pib</b>	-3.16***	-4.78***
<b>Log_DRD</b>	-2.34***	-3.80***
<b>Log_PI</b>	-1.61	-3.32***
<b>PEN</b>	0.11	-0.90
<b>Log_EGES</b>	-1.97	-3.05***
<b>TU</b>	-4.41***	-5.34***
<b>DENS</b>	-2.47***	-3.89***
<b>SPE</b>	-1.74	-2.84***

## Références bibliographiques

ACKET C, VAILLANT J (2011) Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives, Editions Technip.

ADEME (2016) Mix électrique 100 % renouvelable à 2050, Evaluation macro-économique.

AGGER A (2010) Involving citizens in sustainable development: evidence of new forms of participation in the Danish Agenda 21 schemes. *Local Environment*, vol. 15, no 6, p. 541-552.

AKLIN M, URPELAINEN J (2013) Political competition, path dependence, and the strategy of sustainable energy transitions. *American Journal of Political Science* 57(3), p. 643–658.

ANDOURA S, VINOIS JA (2015) De la communauté européenne de l'énergie à l'union de l'énergie une proposition politique pour le court et le long terme, *La Revue de l'Énergie* n° 626 – juillet-août 2015

APERGIS N, DANULETIU D C (2014) Renewable energy and economic growth: evidence from the sign of Panel long-run causality. *International Journal of Energy Economics and Policy* 4, p. 578-587.

APERGIS N, PAYNE J-E (2011) On the causal dynamics between renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in developed and developing countries. *Energy Systems* 2, p. 299-312.

APERGIS N, PAYNE JE, MENYAH K, WOLDE-RUFAEL Y (2010) On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecol. Econ.* 69, p.2255-2260.

AYRES R, VOUDOURIS V (2014) The economic growth enigma: capital, labour and useful energy?, Elsevier, *Energy Policy* n°64, p. 17-19.

BAI J, NG S (2004) A PANIC attack on unit roots and cointegration, *Econometrica*, 72, p. 1127-1177.

BECKERMAN W (1992) Economic growth and the environment: whose growth? whose environment?, *World Development*, n°20, p. 481-496.

BEN JEBLI M, BEN YOUSSEF S (2013) Combustible Renewables and Waste Consumption, Exports and Economic Growth: Evidence from Panel for Selected MENA Countries. MPRA Paper 47767. University Library of Munich, Germany.

BEN JEBLI M, BEN YOUSSEF S, OZTURK I (2014) The Role of Renewable Energy Consumption and Trade: Environmental Kuznets Curve Analysis for Sub-saharan Africa Countries. Online at. <http://mpa.ub.uni-muenchen.de/54300/>.

Breitung J (2001) The local power of some unit root tests for panel data. In Baltagi B (ed) *Nonstationary panels, panel cointegration*. *Adv Econom* 15: p.161–177. JAI Press, Amsterdam.

BEUGELSDIJK S, KLASTING M-J, MILIONIS P (2018) Regional economic development in Europe: the role of total factor productivity. *Regional Studies* 52(4), p. 461-476.

Bildirici M.E (2013) Economic growth and biomass energy, *Biomass Bioenergy* 50, p.19-24.

BIRD L, BOLINGER M, GAGLIANO T, WISER R, BROWN M, PARSONS B (2005) Policies and market factor driving wind power development in the United States. *Energy Policy* 3, p. 1397–1407.

Birdsall N, Kelley A, Sinding S (2001) *Population matters: demographic change, economic growth and poverty in the developing world*, Oxford Economic Press, Oxford, UK.

BLAZEJCZAK J, BRAUN F G, EDLER D, SCHILL W P (2014) Economic effects of renewable energy expansion: A model-based analysis for Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, p.1070-1080.

BONNAFOUS A, BOUCQ E, GLACHANT M, HIVERT L, KAUFMANN V, GOYON M, MADRE J.L, ORTRA N, VINCENT S, WINGERT J.L (2010) *Pétrole, mobilité, CO2 : Les politiques publiques et l'automobilité face à la variation des prix du pétrole* , Rapport Final : mai 2010

BUCHNER BK, GALEOTTI Marzio (2003) *Climate Policy and Economic Growth in Developing Countries*, FEEM Working Paper No. 91.2003

BULAVSKAYA T, REYNÈS F (2018) Job creation and economic impact of renewable energy in the Netherlands, *Renewable Energy* 119, p.528-538

BURBAGE F (2013) *L'invention du développement durable-soutenable. Des équivoques constitutives*, Philosophie du développement durable, pages 25 à 52.

Brochure du ministère de l'Economie et des Finances, *Comprendre pour choisir*, 2003

BROCK WA, TAYLOR MS (2010) The green Solow model, *Journal of Economic Growth*, N°. 15, p. 127 – 153.

BRUHL G (2016) *Éléments de comparaison des différents modes de production d'électricité, Quelles énergies pour les générations futures : les défis à relever*, Paris CISP 1/12/2016.

CADORET I, PADOVANO F (2016) The political drivers of renewable energies policies. *Energy Economics* 56, p. 261-269

CAMILLE D (2014) *L'énergie solaire travail de technologie en 3ème sur l'énergie solaire*.

CELLEUX G (1990) *Analyse discriminante sur variables continues*, Collection didactique, INRIA.

CHANG T, GATWABUYEGE F, GUPTA R, INGLES-LOTZ R, MANJEZI NC, SIMOKENGNE BD (2014) Causal relationship between nuclear energy consumption and economic growth in G6 countries: evidence from panel Granger causality tests. *Prog. Nucl. Energy* 77, p.187-193

COLLARD F (2015) *Les énergies renouvelables*, Courrier hebdomadaire du CRISP 2015/7-8 (N° 2252-2253), p.5-72.

COUR DES COMPTES (2018) *Le soutien aux énergies renouvelables*, Communication à la commission des finances du Sénat.

DE CHARENTENAY J, LESEUR A, BORDIER C (2012) *Le Schéma régional climat-air-énergie : un outil d'orientation pour la transition énergétique et climatique des régions française*. Etude Climat CDC 36, p. 1-32.

- DE HENRI S (2012) La situation énergétique en France et dans le monde, EDP sciences.
- DE PERTHUIS C (2013) La « Transition énergétique » : Les ambiguïtés d'une notion à géométrie variable, Les Cahiers de la Chaire Economie du Climat, n° 21.
- DHartmann M (1999) Electricity generation from solid biomass via co-combustion with coal: Energy and emission balances from a German case study. Biomass and Bioenergy, Volume 16, Issue 6 , Pages 397-406.
- DINCER I, ROSEN MA (1999) Energy, Environment and Sustainable Development, Applied Energy, vol.64(1-4), pp.427-440,
- DUMITRESCU E I, HURLIN I (2012) Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels, Economic Modelling, 2012, vol. 29, issue 4, 1450-1460
- DURUISSEAU K (2015) Le développement des centrales photovoltaïques au sol dans les territoires du sud de la France, état de lieux, facteurs et territorialisation, BSGLG, 64, 2015, 23-40
- ERTUR C (2017) Tests de non stationnarité et tendances non linéaires, HAL Id: hal-01538727 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01538727>.
- FILLOUX A (2014) Intégrer les énergies renouvelables, Collection Guide - Bâtir le développement durable
- FIGLIORE K (2006) Irréversibilité Mixte, valeur d'option et modularité : une application à l'investissement électronucléaire. Economies et Sociétés série Economie de l'Energie ISMEA 10-11, p. 1595-1618.
- GABRIEL F (2019) Chauffe-Eau Solaire et Panneau Thermique, Le Guide avancé 2019.
- GASTOU M (2014) Le charbon, matière combustible Son histoire scientifique et humaine.
- Grossman G M, Krueger AB (1991) Environmental impacts of the North American Free Trade Agreement, NBER working paper 3914.
- Groupe GDF SUEZ Projet de parc éolien en mer des deux côtes, Compagnie du Vent.
- Hadri K (2000) Testing for stationarity in heterogeneous panel data. Econom J 3(2): p.148–161.
- HANSEN J-P, PERCEBOIS J (2017) Transition(s) électrique(s), ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire. Odile Jacob.
- HANSEN J-P, PERCEBOIS J (2015) Energie : Economie et politiques, deboeck Supérieur.

HARTMANN D, KALTSCHMITT M (1999) Electricity generation from solid biomass via co-combustion with coal: Energy and emission balances from a German case study, *Biomass and Bioenergy*, Volume 16, Issue 6, June 1999, p.397-406.

HARRIS R, TZAVALIS E (1999) Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed, *Journal of Econometrics*, 1999, vol. 91, issue 2, p.201-226

Haveman R (1989) Thoughts on the sustainable development concept and the environmental effects of economic policy, paper presented to an OECD seminar on sustainable development (October).

HOFFERT M-I, CALDEIRA K, BENFORD G, CRISWELL D-R, GREEN C, HERZOG H (2002) Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet. *Science* 298 (5595), p. 981-987.

HUBERTY C (1994) *Applied discriminant analysis*, Wiley.

Hurlin C, Mignon V (2015) *Statistique et Probabilités en Economie-Gestion*, Dunod, Collection Openbook.

Iancu I, Racasanu F, Voronca MM (2013) *Promotion of renewable energy sources in Romania: current status and business opportunities*, Ministry of Economy and Commerce, 2004

IM KS, PESARAN MH, SHIN Y (2003) Testing for unit roots in heterogeneous panels, *J Econom* 115(1): p.53-74.

JÄGER-WALDAU A, OSSENBRINK H (2004) Progress of electricity from biomass, wind and photovoltaics in the European Union, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, vol. 8, issue 2, 157-182

JEULIN M, DELBOSC A (2011) *Le rôle des collectivités territoriales dans le soutien public aux énergies renouvelables - Exemples en Europe et en France*. Etude Climat CDC 30, p.1-32.

Kao C (1999) Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data. *J Econom* 90(1): p.1-44.

Kao C, Chen B (1995) On the estimation and inference for cointegration in panel data when the cross section and time series dimensions are comparable, Manuscript, Center for Policy Research, Syracuse University, New York.

KAO C, CHIANG MH (2000) On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data, *Advances in Econometrics*, 15, edited by B. Baltagi et C. Kao, pp. 179-222, Elsevier Science.

KARLSTRØM H, RYGHAUG M (2014) Public attitudes towards renewable energy technologies in Norway. The role of party preferences, *Energy Policy*, 2014, vol. 67, issue C, p.656-663

KILINC-ATA N (2015) The Impact of Government Policies in the Renewable Energy Investment: Developing a Conceptual Framework and Qualitative Analysis, *Global Journal of Management and Business Research*, p.067-081

Kuznets S (1955) Economic Growth and Income Equality, *American Economic Review*, n° 45, p.1 – 28.

LE BARS Y, FAUGERE E, MENANTEAU P (2012) L'énergie dans le développement de la nouvelle-calédonie.

LEBART L, MORINEAU A, PIRON M (2000) *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, 3ème édition Dunod, p. 439.

LECHENE JM (2015) Développer l'énergie éolienne dans un contexte réglementaire mouvant, *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 2015/2 (N° 78), pages 57 à 61

LECLERCQ M, VIEILLEFOSSE A, BARBER N, LEMAIRE Y, GRENON G, THABET S (2013) Les dispositifs de soutien à la production d'énergie renouvelable, *Panorama énergies-climat*.

Lee CC, Chiu YB (2011) Oil prices, nuclear energy consumption, and economic growth: new evidence using a heterogeneous panel analysis, *Energy Policy* 39, p.2111-2120.

LEHR U, ULRICH P (2017) Economic Impacts of Renewable Energy Increase in Germany in Towards 100% Renewable Energy, *UYAR T.S*, P. 263-272.

LEVIN A, CHIEN-FU L(1992) Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties, *University of California, Discussion Paper*. San Diego.

LEVY JP, ROUDIL N, FLAMAND A, BELAID F (2014) Les déterminants de la consommation énergétique domestique, flux 2014/2 (N°96), pages 40 à 54.

LOORBACH D (2010) Transition management for sustainable development: a prescriptive, complexity-based governance framework. *Governance* 23, p. 161–183.

MARILLIER F (2007) Crise énergétique : il n'est pas trop tard pour s'en sortir ..., *revue-nouvelles fondations* 2, page-63.

MARQUES AC, FUINHAS J-A, MANSO J (2010) Motivations driving renewable energy in European countries. *Energy Policy* 38, p.6877-6885.

MARQUES A, FUINHAS J (2011) Drivers promoting renewable energy: A dynamic panel approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p.1601-1608.

MENZ B VACHON S (2006) The effectiveness of different policy regimes for promoting wind power: Experiences from the states. *Energy Policy* 34, p.1786–1796.

MENYAH K, RUFAEL Y(2010) CO2 emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US. *Energy Policy* 38, p.2911-2915.

MERENNE-SCHOUMAKER B (2011) *Géographie de l'énergie : acteurs, lieux et enjeux*, collection Belin Sup Géographie, Paris, p.272.

MOON HR, PERRON B (2004) Testing for a unit root in panels with dynamic actors, *J Econom* 122(1):p.81–126.

MOSS R, EDMONDS JA, HIBBARD K, MANNING M (2010) The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment, *Nature* 463(7282),p.747-56

Naser H (2015) Can nuclear energy stimulate economic growth? evidence from highly industrialised countries, *Int. J. Energy Econ. Policy* 5, p.164-173.

NIFENCKER H (2014) Éléments pour une politique raisonnée de l'énergie, les fiches du conseil scientifiques-sauvons le climat.

OcalO, Aslan A (2013) Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28, p.494-499

OCDE (2015) Rapport accompagnant l'inventaire OCDE des mesures de soutien pour les combustibles fossiles, 21septembre.

ODUM EP (1971) *Fundamentals of ecology*, Philadelphia, PA, W.B. Saunders.

O'Neill B, Chen B (2002) Demographic determinants of household energy use in the United States, *Population and Development Review*, vol.28: 53-88.

PACESILA M, BURCEA S.G, COLESCA S.E (2016) Analysis of renewable energies in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, p.156–170.

PANAYOTOU T (1993) Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development, Tech. rep., International Labour Organization.

Panorama énergies-climat (2013) Les dispositifs de soutien à la production d'énergie renouvelable.

PAO HT, FU HC (2013) Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, p.381-392.

PEDRONI P (1996) Fully modified OLS for heterogeneous cointegrated panels and the case of purchasing power parity, Working Paper in Economics, Indiana University.

PEDRONI P (1999) Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. *Oxf Bull Econ Stat* 61(S1):p.653–670.

PEDRONI P (2004) Panel cointegration: asymptotic and finite sample properties of pooled time series tests with an application to the PPP hypothesis. *Econom Theory* 20(03): p.597–625.

PERCEBOIS J (2014) Les mécanismes de soutien aux énergies renouvelables, leurs forces et leurs faiblesses respectives, *Cahier de recherche* n° 14.03.107.

- PESARAN MH (2003) A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross Section Dependence, Mimeo, University of Southern California.
- PESARAN MH (2006) Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure. *Econometrica* 74: p.967–1012.
- PESARAN MH (2006) Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure. *Econometrica* 74: p.967–1012.
- PESARAN MH (2007) A sample panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *J Appl Econom* 22(2):p.265–312.
- PESARAN MH, SMITH RP (1995) Estimating long-run relationships from dynamic heterogeneous panels. *Journal of Econometrics* 68: p. 79–113.
- PESARAN MH, YAMAGATA T (2011) Panels with non-stationary multifactor error structures, *Journal of Econometrics*, 2011, vol. 160, issue 2, p.326-348.
- PHILLIPS PCB, HANSEN BE (1990) Statistical Inference in Instrumental Variable Regression with I(I) Processes, in *Review of Economic Studies* 57(1): p.99-125.
- REILLY J (2015) Energie et développement dans les pays émergents, *Revue d'économie du développement*, Vol. 23, pages 19 à 41.
- RENTIZELAS A, TATSIPOULOS IP, TOLIS AI (2008) An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply, *Biomass and Bioenergy* 33(2):223-233.
- ROHATGI U, JO J-H, LEE J-C, BARI R-A (2002) Impact of the Nuclear Option on the Environment and the Economy. *Nuclear Technology* 137(3), p.252-264.
- ROEGEN NC (2006) *La décroissance : Entropie, Ecologie, Economie*, Editions Sang de la Terre, Paris.
- ROJEY A (2008) *La transition énergétique*, Broché – 5 mars 2008.
- RUIZ GOMEZ LM (2012) *Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques: approches techniques et économiques*, Université de Grenoble, 2012GRENT089.
- SADORSKY P (2009a) Renewable energy consumption, CO2 emissions and oil prices in the G7 countries. *Energy Economics* 31, p. 456-462.
- SADORSKY P (2009b) Renewable energy consumption and income in emerging economies. *Energy Policy* 37, p.4021-4028.
- SAFA H (2012) Heat recovery from nuclear power plants, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 42, p.553– 559.
- SAIKKONEN P (1991) Asymptotically Efficient Estimation of Cointegrating Regressions, *Econometric Theory*, 7, p.1-21.
- SAMEDY S (2015) *Avantages et inconvénients des énergies décarbonées : solutions pour les combiner efficacement*, Mémoire –Concours Sauvons le Climat, Grenoble INP –ENSE3.



SAPORTA G (2006) Probabilités, analyse des données et statistique, 2ème édition Technip.

SENAT (2013) Rapport d'information fait au nom de la délégation aux collectivités territoriales et à la décentralisation sur les collectivités territoriales : mobiliser les sources d'énergies locales, Sénat session ordinaire de 2012-2013, n°623.

SEVESTRE P (2002) Économétrie des données de panel, Collection : Éco Sup, Dunod, septembre 2002.

SHAFIEI S, SALIM R-A (2014) Urbanization and renewable and non-renewable energy consumption in OECD countries: An empirical analysis. *Economic Modelling* 38, p. 581-591.

SHRIMALI G, KNIEFEL J (2011) Are government policies effective in promoting deployment of renewable electricity resource? *Energy Policy* 39, p.4726-4741.

SKYTTE K, MEIBOM P, HENRIKSEN TC (2006) Electricity from biomass in the European Union - With or without biomass import, in *Biomass and Bioenergy* 30(5):385-392.

SOLOW RM (1956) A contribution to the theory of economic growth, *Quarterly Journal of Economics*, LXX, p. 65 – 94.

SMILV (1994) *World History and Energy*.

STERN D (2004) The rise and fall of the environmental Kuznets curve, *World Development*, 32, p. 1419-1439.

Stern DI, Kander A (2012) The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth. *Energy Journal*, 33 (3), 125-152.

STERLACCHINI A (2006) Innovation, knowledge and regional economic performances: regularities and differences in the EU. Working Papers 260 Università Politecnica delle Marche (I), Dipartimento di Scienze Economiche e Sociali.

STERN N (2006) *Stern Review: The Economics of Climate Change*.

STERN D (2003) Energy and economic growth, department of economics, Rensselaer Polytechnic Institute, USA, 12180, P.3590.

STOCK JH, WATSON MW (1988) Testing for Common Trends, *Journal of the American Statistical Association*, 83, p.1097-1107.

TIWARI AK (2011) A structural VAR analysis of renewable energy consumption, real GDP and CO2 emissions: Evidence from India, *Economics Bulletin*, AccessEcon, vol. 31(2), pages 1793-1806.

TORVANGER A, MEADOWCROFT J (2011) The political economy of technology support: Making decisions about CCS and low carbon energy technologies. *Global Environmental Change* 21, p. 303–312.

TOTH F-L, ROGNER H (2006) Oil and nuclear power: Past, present and future. *Energy Economics* 28, p. 1–25.

TREPANT I (2008) Pays émergents et nouvel équilibre des forces, Courrier hebdomadaire du CRISP, 2008/6-7 (n° 1991-1992), pages 6 à 54.

TUGCUT (2013) Disaggregate energy consumption and total factor productivity: a cointegration and causality analysis for the Turkish economy. Int. J. Energy Econ. Policy 3, p.307-314.

UNRUH G (2000) Understanding carbon lock-in. Energy Policy 28, p.817-830.

UNRUH G (2002) Escaping carbon lock-in. Energy Policy 30, p. 317-325.

VAN RUIJVEN B, VAN VUEN D-P (2009) Oil and natural gas prices and greenhouse emissions mitigation. Energy Policy 37, p. 4797-4808.

YANG J, ZHANG W, ZHANG Z (2016) Impacts of urbanization on renewable energy consumption in China. Journal of Cleaner Production 114, p. 443-451.

Yoo SH., Jung KO (2005) Nuclear energy consumption and economic growth in Korea, Prog. Nucl. Energy 46, p.101-109.

YOO SH, KU SJ (2009) Causal relationship between nuclear energy consumption and economic growth: a multi-country analysis. Energy Policy 37, p.1905-1913.

WANG Z, SHI C, LI Q, WANG G (2011) Impact of heavy industrialization on the Carbon emissions: An empirical study of China, Energy Procedia, 5, p.2610-2616.

WESTERLUND J (2007) Testing for error correction in panel data. Oxford Bulletin of Economics and Statistics 69: p.709–748.

ZUINDEAU B, (2005) Analyse économique des disparités écologiques spatiales : une étude à partir des départements français. Revue d'Économie Régionale & Urbaine 2005/3 (juillet), p.331 à 354

ZANINETTI JM (2012) La question énergétique dans les espaces de l'Amérique du nord , pages 119 à 134

ZAWAYDEH S (2015) Energy efficiency, renewable energy targets, and CO2 reductions expected by 2020. Strategic Planning for Energy and the Environment, 35(2), 18-47.

Zeng Y, Vaupel J, Zhenglian W (1998) Household projection using conventional demographic data, in Lutz and al (eds), 1998, Frontiers of population forecasting, Population and Development Review, vol.24, 59-87.

### **Webographie**

<http://www.energiesrenouvelable.fr>

Site de l'observatoire des énergies renouvelables <http://www.observer.org>

Site de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie <http://www2.ademe.fr/>

Site du Comité de Liaison Energies Renouvelables (CLER) <http://www.cler.org>

Site de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques <https://www.insee.fr/fr/accueil>

Commissariat général au développement durable (CGDD) <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/>