



HAL
open science

PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE PACA Quelles transformations futures du territoire pour assurer une transition énergétique et d'économie circulaire ?

Carlos Andrade

► **To cite this version:**

Carlos Andrade. PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE PACA Quelles transformations futures du territoire pour assurer une transition énergétique et d'économie circulaire?. Optimisation et contrôle [math.OC]. Université Paris sciences et lettres, 2021. Français. NNT: 2021UPSLM047. tel-03608657

HAL Id: tel-03608657

<https://pastel.hal.science/tel-03608657v1>

Submitted on 15 Mar 2022

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

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



THÈSE DE DOCTORAT

DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à MINES ParisTech

« PROSPECTIVE ENERGETIQUE PACA : Quelles transformations futures du territoire pour assurer une transition énergétique et d'économie circulaire ? »

Soutenue par

Carlos ANDRADE

Le 24 septembre 2021

Ecole doctorale n° 84

**Sciences de Technologies de
l'information et de la
Communication**

Spécialité

**Contrôle, Optimisation,
Prospective**

Composition du jury :

Nathalie, LAZARIC Directrice de Recherche, CNRS	<i>Présidente du jury</i>
Olivia, RICCI Maître de conférences, Université de La Réunion	<i>Rapporteuse</i>
Emmanuel, HACHE Professeur associé, IFPEN	<i>Examineur</i>
Gilles, LAFFORGUE Professeur associé, TBS Education	<i>Examineur</i>
Jean-Paul, MARMORAT Directeur de recherche, MINES ParisTech	<i>Examineur</i>
Jean-Charles, HOURCADE Directeur de recherche émérite, CIRED	<i>Examineur</i>
Sandrine, SELOSSE Chargé de recherche, MINES ParisTech	<i>Directrice de thèse</i>
Nadia, Maïzi Professeure, MINES ParisTech	<i>Co-encadrante</i>



**PROSPECTIVE ENERGÉTIQUE SUD PACA :
Quelles Transformations du Territoire pour assurer
une Transition Énergétique et d'Économie Circulaire ?**

Carlos ANDRADE

Thèse dirigée par Sandrine SELOSSE et Nadia MAÏZI

Centre de Mathématiques Appliquées

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Université PSL

Août 2021

RÉSUMÉ

La lutte contre le réchauffement climatique et la réduction des tensions dues à l'utilisation des ressources requièrent des changements drastiques quant à la façon dont l'humanité interagit avec l'environnement et comment elle doit concevoir et gouverner les systèmes énergétiques à l'avenir, autrement dit comment arriver à des systèmes durables. La mise en œuvre de cette transition touche notamment les territoires infranationaux où sont localisées la majeure partie de la production des déchets et de la pollution mais également plusieurs ressources dont l'exploitation peut contribuer à l'atteinte d'objectifs ambitieux de décarbonation et de durabilité. Cela place les collectivités locales comme des acteurs incontournables dans cette transition, qui sont davantage pris en compte dans la définition des politiques visant la décarbonation des systèmes énergétiques. En France, la déclinaison de la politique énergétique vers ces territoires atteint une étape importante avec la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte de 2015 car elle invite ces derniers à contribuer à la décarbonation du pays en favorisant la mobilisation des ressources énergétiques locales, renouvelables, en leur donnant davantage de compétences pour le faire. La France envisage également de passer à une économie circulaire, laquelle vise à instaurer un système de consommation et production plus durable, en transformant les déchets en ressources qui seront réutilisées dans le système économique, minimisant ainsi la consommation de ressources et la production de pollution. Pour tous ces enjeux à relever pour construire demain, l'utilisation d'outils de modélisation prospective s'avère déterminante en ce qu'elle permet de répondre aux différentes questions qui émergent dans la poursuite de solutions énergétiques durables et neutres en carbone. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de thèse réside dans l'étude de systèmes énergétiques locaux, en particulier de la région française SUD PACA et des options qui s'offrent à elle pour assurer une transition énergétique et d'économie circulaire. Dans un premier temps, les enjeux énergétiques considérés par des outils de modélisation énergétique ont été discutés en montrant comment singulièrement ces modèles ont convergé vers l'étude de la transition énergétique tant au niveau mondial que national et, en particulier, comment ces études s'appliquent de plus en plus aux systèmes énergétiques de territoires infranationaux. Puis, nous avons mis en évidence le rôle croissant pris par les collectivités territoriales dans la définition et la mise en œuvre de politiques énergie-climat-environnement, en nous concentrant en particulier sur le cas de la France. Malgré l'intérêt croissant porté par les gouvernements, les scientifiques et les entreprises au concept d'économie circulaire comme stratégie pour faire face aux problématiques d'épuisement des ressources, un consensus fait défaut quant à ses principes, objectifs et définition. Pour y contribuer, nous proposons une définition intégrant les aspects clés qui ont été mentionnés dans différentes études concernant ce concept. Finalement, en nous appuyant sur le modèle de prospective TIMES SUD PACA que nous avons construit, nous montrons que les collectivités territoriales sont déterminantes pour atteindre les objectifs de décarbonation nationaux et internationaux, à travers la mobilisation de leurs ressources et l'adoption de politiques de décarbonation ambitieuses adaptées à leur contexte économique et démographique. Pour se faire, l'économie circulaire est un levier incontournable, mais elle doit être accompagnée d'une allocation stratégique de leurs ressources : par exemple dans le cas de la région SUD PACA, destiner l'hydrogène aux poids lourds et à la production de gaz de synthèse, ce dernier devant alors n'être alloué qu'aux secteur industriel, ou encore prioriser la récupération de chaleur dans le secteur résidentiel-tertiaire.

ABSTRACT

Fighting global warming and reducing tensions over resource use requires drastic changes in how humanity interacts with the environment and how it should design and govern energy systems in the future, in other words, how to achieve sustainable systems. The implementation of this transition affects in particular sub-national territories where most of the production of waste and pollution are located, but also several resources whose use can contribute to the achievement of ambitious decarbonization and sustainability objectives. This places local territories as key players in this transition, so they are taken more into account in the definition of policies targeting the decarbonization of the energy system. In France, the implementation of the energy policy towards these territories has reached an important stage with the law relating to the Energy Transition for Green Growth of 2015 because it invites them to contribute to the decarbonization of the country by promoting the mobilization of local renewable energy resources by giving them the competences to do so. France is also considering moving to a circular economy, which aims to establish a more sustainable consumption and production system, by transforming waste into resources that will be reused in the economic system, thus minimizing the consumption of resources and the production of pollution. To propose solutions to all these challenges, the use of prospective modeling tools is decisive, as they can provide with answers to the various questions that emerge in the pursuit of sustainable and carbon neutral energy solutions. In this context, the objective of this work lies in the study of local energy systems, in particular of the French region SUD PACA and the available options that can ensure an energy and circular economy transition. First, the energy issues considered by energy modeling tools were discussed by showing how these models converged singularly towards the study of the energy transition both at the global and national level and, in particular, how these studies are increasingly applicable to the energy systems of sub-national territories. Then, we highlighted the growing role played by local authorities in defining and implementing energy-climate-environment policies, focusing in particular on the case of France. Despite the growing interest by governments, scientists and businesses in the concept of the circular economy as a strategy to deal with issues of resource depletion, a consensus is lacking on its principles, objectives and definition. To contribute to this, we propose a definition that integrates key aspects that have been mentioned in various studies concerning this concept. Finally, based on the TIMES SUD PACA prospective model that we have built, we show that local authorities are decisive in achieving national and international decarbonization objectives, through the mobilization of their resources and the adoption of ambitious decarbonization measures adapted to their economic and demographic context. To do so, the application of a circular economy perspective is essential, but it must be accompanied by a strategic allocation of their resources: for example, in the case of the SOUTH PACA region, targeting hydrogen for freight transport vehicles and for the production of synthesis gas, the latter then having to be allocated only to the industrial sector, or to prioritize heat recovery for the residential-tertiary sector.

REMERCIEMENTS

Cette aventure de recherche prospective, qui a commencé il y a plus de trois ans, s'est déroulée en un clin d'œil. Il faut dire que le temps passe vite quand on s'amuse. En réalité, cette période a été très enrichissante. D'une part, j'ai pu découvrir les beaux paysages du sud-est de la France et en apprendre plus sur son histoire, sa culture et sa langue. D'autre part, je me suis rencontré de nouveau avec l'économie circulaire, qui est un sujet qui me passionne. Néanmoins, tout au long de cette période, j'ai également eu à faire face à plusieurs défis qui m'ont conduit à dépasser mes limites et à développer de nouvelles qualités pour les surmonter. Je n'aurais pu atteindre aucun objectif au long de ce parcours sans le précieux soutien et l'aide de plusieurs personnes. Par conséquent, le texte ci-dessous est dédié à toutes ces personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à cette expérience.

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, qui a aligné parfaitement les événements m'ayant mis sur la voix de l'investigation scientifique. Je voudrais ensuite adresser mes remerciements aux rapporteurs, Nathalie Lazaric et Olivia Ricci, et aux membres du jury, Emmanuel Hache, Gilles Lafforgue, Jean-Paul Marmorat et Jean-Charles Hourcade, qui ont consacré leur précieux temps à l'évaluation de ce long travail de thèse.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements également à Nadia Maizi pour m'avoir ouvert les portes du CMA. Ensuite, je suis très reconnaissant à Sandrine Selosse qui, par ses conseils, a su m'inculquer la pensée scientifique et me guider tout au long de ma recherche. Elle m'a transmis aussi sa passion pour la recherche, sa positivité et énergie, de sorte qu'après chaque réunion, je repartais motivé pour continuer ce long voyage. Je la remercie également pour sa rigueur, qui m'a amené à exiger davantage de moi-même et ainsi à réaliser un excellent travail. Je la remercie aussi pour tout le temps qu'elle a consacré dans la relecture de ce manuscrit.

Je souhaite également remercier Mathieu Denoux pour la première relecture de ce manuscrit. Ses corrections et commentaires m'ont beaucoup aidé à améliorer ma rédaction en français (je dois admettre que la rédaction de la thèse en français a été l'un des défis les plus difficiles que j'aie jamais rencontré). Je remercie très chaleureusement Gildas Siggini qui a été l'un des appuis les plus importants tout au long du processus d'apprentissage de l'outil de modélisation TIMES et pour tout le soutien qu'il a pu m'apporter lors de mon séjour au CMA. A cet égard, je tiens également à remercier Gondia Seck qui, à plusieurs occasions, m'a appris de nombreuses astuces sur la modélisation TIMES ; elles m'ont été très utiles pour réaliser une modélisation de qualité.

Je veux également exprimer ma gratitude à l'équipe d'AtmoSud, en particulier à Romain Souweine, Damien Bouchard et Benjamin Rocher, d'abord pour m'avoir donné accès aux données très détaillées sur les consommations énergétiques de la région SUD PACA, grâce auxquelles j'ai pu réaliser une étude minutieuse des options de décarbonation de la région, mais aussi pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me permettant de contribuer au développement du plan de protection de l'atmosphère des Alpes-Maritimes, des Bouches-du-Rhône et du Var.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à tout le personnel du CMA pour le soutien apporté tout au long de ma thèse (Catherine, Alice, Amel, Sébastien, Damien, Claire, Valérie, Sophie, Valentina, Wellington, Edi, Gilles, Jean-Paul) et toute ma gratitude à tous les doctorants et doctorantes du centre qui y ont rendu plus agréable mon séjour (Lucas, Naima, Rabab, Amir, Paul, Louis, Arnold, Ariane, Remy, Yacine et Gratien).

Merci aussi à l'ADEME et la région SUD PACA pour le soutien financier sans lequel cette thèse n'aurait pu être menée. Je remercie notamment Madame Valérie Pineau de l'ADEME pour tout l'appui administratif.

Enfin, je tiens à remercier énormément ma femme bien-aimée Andrea Carrion, qui, avec tout son amour a su me soutenir à tout moment et m'a accompagné chacune des longues nuits de modélisation et de rédaction. Je remercie également toute ma famille d'avoir été à mes côtés malgré la distance et de m'avoir offert leur soutien inconditionnel.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 – Les modèles énergétiques : Evolution des enjeux.....	6
1.1. La modélisation énergétique et prospective.....	7
1.1.1. Premiers développements des modèles énergétiques et premières applications de prospective.....	8
1.1.2. Les crises pétrolières des années 1970.....	10
1.1.3. La modélisation énergétique après la crise pétrolière de 1970.....	11
1.2. La modélisation énergétique et climatique.....	16
1.2.1. La montée des enjeux environnementaux.....	16
1.2.2. Les négociations onusiennes : focus sur la limitation du changement climatique.....	19
1.2.3. La prise en compte des enjeux environnementaux par les modèles énergétiques.....	22
1.3. La modélisation des systèmes énergétiques locaux.....	27
1.3.1. Une déclinaison des modèles énergétiques à l'échelle locale.....	27
1.3.2. L'effet des enjeux climatiques-environnementaux sur l'étude de systèmes énergétiques infranationaux.....	28
1.4. Les enjeux de modélisation de prospective actuels.....	34
1.5. Conclusion.....	39
Chapitre 2 – La gouvernance du secteur énergétique en France : de la centralisation à la déclinaison de la politique énergétique des territoires.....	41
2.1. Histoire de la politique énergétique française et de sa territorialisation.....	41
2.1.1. La centralisation de la gestion du secteur énergétique français.....	43
2.1.2. La décentralisation de la gestion du système énergétique.....	45
2.2. La déclinaison territoriale des politiques énergétiques.....	53
2.2.1. Premières déclinaisons de la politique énergétique des territoires.....	53
2.2.2. Les objectifs énergie-climat des territoires.....	56
2.2.3. La transition énergétique au cœur des territoires.....	57
2.2.4. Des engagements plus ambitieux en faveur du climat et de l'environnement.....	58
2.3. La politique énergétique et d'économie circulaire de la Région SUD PACA.....	61
2.4. Conclusion.....	64
Chapitre 3 – L'économie circulaire : Principes, Objectifs, Définition.....	66
3.1. L'émergence du concept d'économie circulaire.....	67
3.1.1. Concepts et disciplines qui ont servi de base à la construction du concept d'économie circulaire.....	67

3.1.2.	L'apport des différents courants à la construction de l'économie circulaire.....	70
3.2.	L'intégration de l'économie circulaire dans les politiques environnementales.....	75
3.2.1.	Les premières politiques associées à la circularité.....	76
3.2.2.	L'économie circulaire au cœur des politiques environnementales	77
3.2.3.	L'économie circulaire dans le reste du monde.....	78
3.3.	La recherche scientifique sur l'économie circulaire	79
3.3.1.	Les débuts de la recherche scientifique sur l'économie circulaire.....	79
3.3.2.	Discussions autour du concept d'économie circulaire	80
3.3.3.	Proposition de définition de l'économie circulaire	87
3.4	Conclusion	91
Chapitre 4 – Prospective énergétique SUD PACA		93
4.1.	Le modèle TIMES	94
4.1.1.	Un générateur de modèles <i>bottom-up</i> d'optimisation linéaire	95
4.1.2.	Le système énergétique de référence.....	96
4.1.3.	Structure mathématique	96
4.2	Panorama de la région SUD PACA	98
4.2.1.	Contexte énergétique.....	99
4.2.2.	Le secteur du transport	102
4.2.3.	L'industrie.....	103
4.2.4.	Le secteur résidentiel	104
4.2.5.	Le secteur tertiaire	106
4.2.6.	L'agriculture.....	107
4.2.7.	Production	108
4.3.	Un modèle d'aide à la décision développé pour la stratégie de transition énergétique et d'économie circulaire de la région SUD PACA : TIMES SUD PACA	111
4.3.1.	Caractéristiques générales du modèle TIMES SUD PACA.....	111
4.2.2.	Modélisation du système de demandes de services énergétiques.....	114
4.2.3.	Modélisation de l'offre	126
4.2.4.	Les potentiels des énergies renouvelables.....	135
4.4.	Conclusion	144
Chapitre 5 – Prospective des transitions énergétique et d'économie circulaire de la région SUD PACA		145
5.1.	Construction de scénarios pour une stratégie régionale de transitions	145
5.1.1	Scénario de référence (Ref).....	146
5.1.2.	Scénario SRADDET (SR).....	154

5.1.3.	Scénario Neutralité carbone (neutralité-NC)	156
5.1.4.	Scénario Hydrogène (SH2).....	157
5.1.5.	Scénario Économie circulaire (circularité-EC).....	158
5.1.6.	Scénario Autonomie	160
5.2.	Analyse des résultats de prospective	164
5.2.1.	Quelle évolution du secteur énergétique final pour arriver à un territoire durable ..	164
5.2.2.	Quelle évolution du secteur électrique dans une optique de territoire durable ?	176
5.2.3.	Quel rôle joué par les technologies de power-to-gas ?.....	182
5.3.	Analyse de sensibilité - Nouvelles politiques énergétiques	184
5.3.1.	Points de discussion pour de nouvelles politiques.....	184
5.3.2.	Scénario « Nouvelles politiques » (NP).....	185
5.3.3.	Analyse des résultats	187
5.4.	Conclusion	191
CONCLUSION GENERALE		193
Apport et recommandations		193
Limites de l'étude et perspectives.....		195
Annexes		196
Annexe 1 : Politiques énergétiques établies dans le SRADDET		196
Consommation par type d'énergie.....		196
Transport		196
Secteur de l'habitat		197
Industrie.....		198
Production d'énergie.....		199
Annexe 2 : Zones potentielles pour la production d'électricité d'origine éolienne en 2020 et 2030 (Valorem-Conexia Energy, 2010).....		201
Annexe 3 : Potentiel géothermique mobilisable (extrait de (BRGM, 2013))		201
Annexe 4: Liste des principales technologies de production d'électricité disponibles dans le modèle TIMES SUD PACA		202
Annexe 5: Consommation d'énergie finale par zone d'étude.....		203
Annexe 6 : Consommation énergétique en 2050 pour le secteur résidentiel-tertiaire par scénario par zone d'étude et par type d'énergie consommé.....		204
Annexe 7 : Consommation d'énergie finale pour le secteur du transport en 2050 par scénario, par zone d'étude et par type d'énergie consommée		205
Annexe 8 : Production d'hydrogène en 2050 par zone d'étude et par type de production.....		206
Annexe 9: Production vs consommation de biogaz par zone d'étude.....		207

BIBLIOGRAPHIE	208
VALORISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE	233

Table des figures

Figure 1 : Outils de planification déclinant la politique énergétique et climatique nationale aux territoires.....	59
Figure 2 : Principes proposés pour l'EC	86
Figure 3 : Représentation graphique de l'économie circulaire	91
Figure 4 : Exemple de système énergétique de référence (RES) du modèle TIMES mondial, TIAM-FR (Kang, 2017).....	96
Figure 5 : Consommation par type d'énergie finale de la région SUD PACA pour la période 2007 - 2017	100
Figure 6 : Consommation énergétique par secteur de consommation de la région SUD PACA	100
Figure 7 : Consommation énergétique par secteur et par département de la région SUD PACA	101
Figure 8 : Demande énergétique par secteur d'activité et par type d'énergie en 2017.....	102
Figure 9 : Part de chaque énergie dans la consommation finale du secteur de l'industrie en 2017 ..	104
Figure 10 : Consommation par type d'énergie et par service énergétique dans le secteur résidentiel en 2017	105
Figure 11 : Part des différents énergies dans la production d'énergie dans la région SUD PACA en 2017	108
Figure 12 : Production énergétique par département et par type de production en 2017.....	109
Figure 13 : Évolution des dix dernières années de la production énergétique de la région SUD PACA	109
Figure 14 : Production électrique solaire par département depuis 2012	110
Figure 15 : Système énergétique de référence simplifié de la région SUD PACA	112
Figure 16 : Découpage du territoire de la région SUD PACA en neuf zones pour la modélisation	113
Figure 17 : Exemple de modélisation pour la consommation des autres usages énergétiques et électriques	116
Figure 18 : Modélisation pour la production d'aluminium, du verre et du chaux	119
Figure 19 : Modélisation pour la production du ciment	119
Figure 20 : Modélisation pour la production d'acier.....	120
Figure 21 : Besoin de production de résidences principales entre 2018 et 2030 par zone d'emploi .	121
Figure 22 : RES de la production électrique solaire dans le modèle TIMES SUD PACA.....	128
Figure 23 : SER de la production de biométhane et méthane de synthèse	130
Figure 24 : SER de la production d'hydrogène dans le modèle TIMES SUD PACA	133
Figure 25 : Représentation du réseau gazier dans le modèle TIMES SUD PACA.....	135
Figure 26 : Consommation électrique, production locale et soutirage d'électricité du réseau électrique français	152
Figure 27 : Vision d'un système énergétique circulaire pour la région SUD PACA	159
Figure 28 : Consommation finale par type d'énergie et par scénario en 2050.....	165
Figure 29 : Consommation finale d'énergies fossiles par scénario en 2050	166
Figure 30 : Emissions de CO ₂ par secteur final de consommation et par scénario à l'horizon 2050 ..	167
Figure 31: Évolution de la consommation d'énergie finale pour le secteur de l'habitat et les émissions associées.....	168
Figure 32 : Part de la consommation énergétique pour la production de chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation	169

Figure 33 : Consommation électrique du secteur de l'habitat par scénario en 2050 vs production électrique en toiture et stockage par batteries	170
Figure 34 : Consommation énergétique du secteur du transport à l'horizon 2050 par scénario et par type d'énergie consommée.....	171
Figure 35 : Consommation énergétique par type de véhicule et par scénario en 2050.....	172
Figure 36 : Couverture de la demande de mobilité de courte et longue distance de passagers par les véhicules particuliers et les véhicules à mobilité individuelle.....	173
Figure 37 : Évolution de la consommation énergétique du secteur de l'industrie par énergie et par scénario jusqu'en 2050.....	174
Figure 38 : Production électrique régionale en 2030 et 2050 pour chaque scénario et par type d'énergie utilisée	176
Figure 39 : Production totale d'électricité pour la région par scénario	178
Figure 40 : Electricité soutirée du réseau français par scénario	179
Figure 41 : Production électrique vs soutirage et injection d'électricité par zone d'étude et par scénario en 2050	181
Figure 42 : Production d'hydrogène par technologie.....	182
Figure 43 : Entrants pour la production d'hydrogène par scénario	183
Figure 44 : Production du gaz de synthèse par scénario en 2050.....	184
Figure 45 : Production électrique vs soutirage d'électricité du réseau français et par scénario de sensibilité.....	187
Figure 46 : Consommation énergétique par secteur final de consommation à l'horizon 2050 par type d'énergie pour les scénarios NP, NP_8% et NP_CVD	189
Figure 47 : Consommation énergétique par type de véhicule pour les scénarios NP, NP_8% et NP_CVD	189
Figure 48 : Production d'hydrogène dans les scénarios Nouvelles Politiques, NP 8% et NP_COV	190
Figure 49 : Emissions des gaz à effet de serre pour le scénario Nouvelles Politiques, Taux d'actualisation 8 % et avec une demande pandémie.....	191

Table des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des enjeux abordés par les modèles énergétiques avec un exemple d'outils utilisés et de recherches associées pour chaque catégorie	14
Tableau 2 : Récapitulatif des nouveaux enjeux abordés par les modèles énergétiques avec les différents évènements en faveur de l'environnement et du climat, avec un exemple d'outils utilisées et de recherches associées pour chaque catégorie	26
Tableau 3 : Catégorisation des nouveaux enjeux abordés par les modèles énergétiques locaux, avec un exemple d'outils utilisées et de recherches associées pour chaque catégorie	33
Tableau 4 : Exemples d'outils de modélisation utilisés pour analyser systèmes énergétiques.....	37
Tableau 5 : Objectifs de différentes lois relatives à l'énergie	50
Tableau 6 : Les lois énergétiques françaises et leur répercussion sur la politique énergétique des territoires.....	60
Tableau 7 : Idées et concepts qui ont servi à la construction du concept de l'EC	69
Tableau 8 : Définitions de l'économie circulaire	89
Tableau 9 : Evolution de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel par type d'usage	105
Tableau 10 : Évolution de la consommation dans le secteur tertiaire par besoin énergétique	107
Tableau 11 : Caractéristiques des technologies de demandes pour le secteur résidentiel	115
Tableau 12 : Principales caractéristiques techniques des technologies du secteur du transport.	117
Tableau 13 : Part de chaque véhicule particulier neuf par gamme	117
Tableau 14 : Distance parcourue par les véhicules de D1.....	117
Tableau 15 : kilomètres parcourues par les véhicules de distance D2.....	118
Tableau 16 : Caractéristiques technico économiques des véhicules à mobilité individuelle	118
Tableau 17 : Évolution du nombre des logements et de la population par zone d'étude de la région SUD PACA à l'horizon 2050.....	121
Tableau 18 : Surfaces moyennes de logements existants et neufs.....	122
Tableau 19 : Évolution de la demande des services énergétiques du secteur résidentiel dans le scénario central	123
Tableau 20 : Projection de la demande de service énergétiques à l'horizon 2050 pour le secteur tertiaire.....	124
Tableau 21 : Projection de la consommation du secteur du transport à l'horizon 2050.....	125
Tableau 22 : Le coût des énergies	127
Tableau 23 : Puissance et production de centrales électriques pour l'année de base	127
Tableau 24 : Caractéristiques techniques et économiques de batteries	128
Tableau 25 : Potentiels de STEP en région SUD PACA.....	129
Tableau 26 : Production livrée par les réseaux de chaleur dans la région PACA	129
Tableau 27 : Caractéristiques technico-économiques de technologies de production et stockage d'hydrogène	132
Tableau 28 : Paramètres technico-économiques des technologies de livraison d'hydrogène (extrait de (Sgobbi et al., 2016))	134
Tableau 29 : Potentiel de récupération de chaleur des eaux usées (Antea Group, 2011)	136
Tableau 30 : Potentiels de récupération de chaleur fatale (ADEME, 2017).....	137
Tableau 31 : Potentiel d'hydrogène fatal dans la région SUD PACA (ADEME, 2018).....	137
Tableau 32 : Gisement de production solaire photovoltaïque au sol	138

Tableau 33 : Part du potentiels solaire photovoltaïque au sol par zone	138
Tableau 34 : Potentiel de production électrique sur toiture et sur parking pour la région SUD PACA	139
Tableau 35 : Potentiel de production électrique d’origine éolien	140
Tableau 36 : Part du potentiel éolien par zone de modélisation	140
Tableau 37 : Potentiel géothermique mobilisable	141
Tableau 38 : Potentiel hydraulique résiduel dans les cours d’eau dans la région SUD PACA.....	141
Tableau 39 : Potentiel des matières pour la production du biogaz de deuxième génération issu de (S3D, 2018)	142
Tableau 40 : Gisements des potentiels des énergies renouvelables de la région SUD PACA	143
Tableau 41 : Hypothèse de développement pour la production énergétique.....	150
Tableau 42 : Potentiels d’économie d’énergies pour la rénovation des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire.....	153
Tableau 43 : Objectifs de production d’électricité et de chaleur SRADDET	155
Tableau 44 : Objectifs proposés dans le cadre du Plan régional Hydrogène de la région SUD PACA.	156
Tableau 45 : Budget carbone par secteur	157
Tableau 46 : Principales hypothèses appliquées pour le scénario circularité.....	160
Tableau 47 : Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour le secteur de l’habitat	161
Tableau 48 : Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour le secteur du transport.....	162
Tableau 49: Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour la production électrique.....	163
Tableau 50 : Hypothèses établies pour le scénario nouvelles politiques.....	186
Tableau 51 : Facteurs de variation de la demande énergétique en France en raison de la crise sanitaire	187
Tableau 52 : Objectifs concernant l’évolution du système énergétique de la région SUD PACA	196
Tableau 53 : Objectifs de réduction de la consommation d’énergie par type par rapport à 2007.....	196
Tableau 54 : Objectifs concernant le secteur du transport.....	197
Tableau 55 : Objectifs chiffres pour le secteur de l’habitat	198
Tableau 56 : Autres objectifs ciblant le secteur de l’habitat	198
Tableau 57 : Objectifs concernant le développement du système de production de la région SUD PACA en MW	199
Tableau 58 : Objectifs de production pour le système énergétique de la région SUD PACA.....	200

Table des acronymes

Acronyme	Nom
3R	Réduire, réutiliser et recycler
ADEME	Agence de la Transition Écologique
AGIR	Action Globale Innovante Régionale
AHP	Département des Alpes-de-Haute-Provence
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AM1	Zone à haute consommation du département des Alpes-Maritimes
AM2	Zone à faible consommation du département des Alpes-Maritimes
AUT	Scénario Autonomie
BDR1	Zone à haute consommation du département des Bouches-du-Rhône
BDR2	Zone à faible consommation du département des Bouches-du-Rhône
Boues de STEP	Boues de Stations d'Épuration Urbaines
C2C	Cradle to cradle
CCI	Chambre de Commerce et de l'Industrie
CCI	Chambre de Commerce et de l'Industrie
CCNUCC	Convention Cadre sur les Changements Climatiques
CDN	Contribution déterminée au niveau national
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique (désormais Commissariat A L'Énergie Atomique Et Aux Énergies Alternatives)
CEE	Certificat d'Économie d'Énergie
CER	Communauté d'Énergies Renouvelables
CMED	Commission Mondiale sur l'environnement et le développement
CO₂	Dioxyde de carbone
COP	Conférences des Parties
CSR	Combustibles Solides de Récupération
CUC	Capture et Utilisation du Carbone
EC	Économie circulaire
ECS	Eau chaude sanitaire
EDF	Electricité de France
EMF	Energy Modeling Forum
EnR	Énergie renouvelable
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
ETSAP	Energy Technology Systems Analysis Program
FEM	Fondation Ellen Macarthur
FME	Forum sur la modélisation énergétique
G20	Groupe des 20
G7	Groupe des 7
GDF	Gaz de France
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GNV	Gaz Naturel Véhicule
H₂	Hydrogène
H₂O	Eau

HA	Département des Hautes-Alpes
HCC	Haut Conseil du Climat
HG	Scénario Hydrogène
IAEA	International Atomic Energy Agency
IIASA	Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués
IPCC	Intergouvernemental Panel on Climate Change
LAURE	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie
LEC	Loi Energie Climat
LOADDT	Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le développement durable du Territoire
LTECV	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte
MAB	Man and Biosphere
MAPTAM	Loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles
MARKAL	MARKet Allocation
NC	Scénario Neutralité Carbone
NOME	Nouvelle Organisation du Marché de l'Électricité
NOTRe	Loi Portant la Nouvelle Organisation Territoriale de la République
NP	Scénario Nouvelles Politiques
NP_8%	Scénario Nouvelles Politiques avec taux d'actualisation de 8 %
NP_CVD	Scénario Nouvelles Politiques suivant une demande COVID
O2	Oxygène
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
OMC	Organisation Météorologique Mondiale
ONG	Organisation non gouvernementale
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
P2G	Power-to-Gaz
PAC	Pompe à chaleur
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PADD	<i>Projet d'Aménagement et de Développement Durable</i>
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial
PCET	Plan Climat Énergie Territorial
PDU	Plan de déplacements urbains
PEM	Électrolyseur de type : Proton Exchange Membrane
PIB	Produit Intérieur Brut
PLU	<i>Plan local d'urbanisme</i>
PNLCC	Programme National de Lutte contre le Changement Climatique
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
POPE	Programmation fixant les orientations de la politique énergétique
PPA	Plan de Protection de l'Atmosphère
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
PPI	Programmation pluriannuelle des investissements
PR2E	<i>Programme régional pour l'efficacité énergétique</i>
PREE	Programme Régional pour l'Efficacité Energétique
PRPGD	Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets
PRQA	Plan Régional pour la Qualité de l'Air
PRT	Plan Régional des Transports

REF	Scénario de Référence
S3RENR	Schéma de Raccordement au Réseau des Energies Renouvelables
SCoT	Schéma de cohérence territoriale
SEC	Système Énergétique Circulaire
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
SNDD	Stratégie nationale de développement durable
SO₂	Dioxyde de soufre
SR	Scénario SRADDET
SRADDET	Schéma Régional d'Aménagement et du développement Durable du Territoire
SRADDT	Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire
SRADT	Schéma Régional du Développement du Territoire
SRB	Schéma Régional Biomasse
SRCAE	Schéma Régional Climat Air Énergie
SRE	Schéma Régional Eolien
SRU	Solidarité et Renouvellement urbains
SSC	Schéma des services collectifs
SSCE	Schéma des services collectifs Energie
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System
TIPP	Taxe intérieure sur les produits pétroliers
TSCA	Taxe spéciale sur les contrats d'assurance
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VAE	Véhicule à Assistance Électrique
VAR1	Zone à haute consommation du département du Var
VAR2	Zone à faible consommation du département du Var
VAUC	Département du Vaucluse
VMI	Véhicule à mobilité individuelle
ZAC	Zone d'aménagement concerté

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de l'énergie au fil du temps a permis un important développement de la société mais a également conduit à plusieurs préoccupations. Les crises pétrolières des années 1970 mettent en exergue la dépendance aux énergies fossiles et la vulnérabilité des systèmes énergétiques face aux phénomènes géopolitiques. Ces crises mettent également en évidence les possibles problèmes d'accès aux ressources et les effets que cela pourrait porter pour l'approvisionnement énergétique à l'avenir. L'utilisation accrue des énergies fossiles génère également des émissions de gaz à effet de serre de plus en plus importantes, notamment de CO₂, dont la concentration dans l'atmosphère conduit à un réchauffement climatique ; cela augmente entre autre la probabilité de phénomènes météorologiques extrêmes et d'autres catastrophes naturelles dans le monde. Plus la température moyenne de la planète augmente, plus les conséquences seront graves et imprévisibles. Ainsi, progressivement la société prend conscience de l'impact de ses activités sur l'environnement et cherche à poursuivre son développement suivant des trajectoires moins polluantes, plus responsables vis-à-vis de l'environnement et moins consommatrices de ressources.

Dans cette optique, en 2015, les différents pays du monde ont signé l'Accord de Paris pour limiter la hausse de la température globale à 2°C, voire 1,5°C par rapport au niveau préindustriel, d'ici la fin du XXI^e siècle. Pour y parvenir, il devient notamment nécessaire de réduire massivement et le plus rapidement possible les émissions de gaz à effet de serre. Cela requiert une substitution de l'utilisation des énergies fossiles par des énergies propres et donc, de mettre en place une transition énergétique bas carbone. La réalisation d'une telle transition est l'un des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée de nos jours car elle ne dépend pas seulement du déploiement de solutions technologiques mais exige également un changement complet dans la façon dont la société interagit avec l'environnement et comment elle gouverne les systèmes énergétiques. En effet, les transitions énergétiques passées ont surtout reposé sur l'innovation technologique, comme le passage vers une plus grande utilisation du charbon avec l'invention de la machine à vapeur ou l'utilisation des produits pétroliers avec l'invention du moteur à combustion interne. La transition énergétique actuelle est avant tout portée par la prise de conscience des problèmes environnementaux. Elle est en ce sens beaucoup plus complexe car il ne s'agit pas seulement de promouvoir de nouvelles technologies ou ressources mais de mettre en place un ensemble de nouveaux modes de gouvernance autour de la promotion des technologies et du changement des comportements de consommation, mis en œuvre à travers des actions politiques et sociales. En effet, pour atteindre la décarbonation, une transformation drastique des systèmes énergétiques s'avère nécessaire et inclut notamment la mise en place d'une gouvernance de ces derniers plus inclusive des différents acteurs. L'établissement de la politique énergétique, alors majoritairement centralisée, passe ainsi à une approche plus participative. Les acteurs locaux en particulier, qu'ils soient publics ou privés, voire citoyens, sont davantage consultés et impliqués dans la définition des stratégies énergétiques bas carbone et environnementales, tout comme leurs mises en œuvre. Ceci est d'autant plus déterminant dans le contexte de développement des énergies renouvelables locales pour lequel la réalité et les caractéristiques du territoire influent fortement leur déploiement.

A cet égard, les territoires sont ainsi reconnus comme des acteurs incontournables de la transition énergétique et sont depuis davantage pris en compte dans la définition des politiques qui visent la

décarbonation des systèmes énergétiques. C'est le cas en particulier en France où depuis quelques décennies, les territoires occupent une place croissante dans la définition mais surtout dans la mise en œuvre de la stratégie énergie climat du pays. Plusieurs lois se sont enchaînées à cet effet, dont récemment la loi de la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015. Elle constitue une étape importante dans la territorialisation de la politique énergétique française en conduisant les territoires à contribuer à la transition énergétique, par exemple en favorisant le développement des énergies renouvelables et l'application de solutions durables visant notamment à réduire la consommation de ressources et la prévention de la production de déchets. La France cherche également à rendre son économie moins consommatrice en ressources à travers la mise en œuvre d'une économie circulaire (EC).

L'idée derrière le concept d'EC est le passage d'une économie linéaire où les ressources sont extraites, transformées, consommées et finalement jetées, vers une économie qui cherche à réduire la consommation des ressources, en réintégrant celles considérées comme des déchets dans la chaîne de production ou de consommation. Le consensus autour de ses principes, caractéristiques, objectifs voire de sa définition n'est pas encore atteint car de nombreuses disciplines et concepts ont influencé sa conception. Cependant, l'approche de circularité est de plus en plus évoquée et adoptée par différents décideurs publics dans le monde car elle se présente comme une option de développement permettant de contribuer non seulement à la réduction de la consommation de ressources mais aussi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce cas, on notera que la recherche de solutions de circularité pour les systèmes énergétiques est menée, dans la plupart des cas, isolément, c'est-à-dire que différentes options sont étudiées sans tenir en compte de leur interaction avec d'autres solutions de circularité dans un même système énergétique, ce qui ne permet pas de bien identifier quelles ressources développer, avec quelle technologie et pour quel usage final. En outre, la mise en place de solutions de circularité dépend fortement de la proximité entre les ressources à récupérer et la demande à couvrir. Il en résulte que l'analyse et la mise en œuvre de l'EC doit se structurer en fonction des caractéristiques et des ressources spécifiques du territoire en étude. Par conséquent, l'échelle des territoires infranationaux devient un périmètre d'étude incontournable pour les systèmes énergétiques et la mise en place d'actions visant à réduire leur empreinte environnementale.

Pour répondre aux enjeux de transition énergétique (e.g. quelles énergies développer, à destination de quels usages, à quel horizon, où, etc.) et de solutions de durabilité, comme celle de l'EC, l'utilisation d'outils de modélisation prospective s'avère déterminante. En effet, ceux-ci permettent d'explorer l'évolution du système énergétique à long terme à travers différents scénarios d'évolution possible suivant des contraintes imposées et qui expriment les conditions que l'on cherche à respecter ou à éviter. La modélisation prospective permet ainsi de définir des choix et déterminer des politiques visant à orienter les systèmes énergétiques vers la trajectoire souhaitée. Les premiers outils de modélisation prospective furent conçus pour étudier le développement des systèmes électriques mais leur utilisation s'est significativement accrue et diversifiée avec la crise pétrolière. Leur rôle comme outil d'aide à la prise de décision s'impose incontestablement lui aussi avec la prise de conscience des défis environnement-climat à relever. Ils permettent en effet de répondre aux différentes questions qui émergent dans la poursuite de trajectoires visées comme celles portant sur le développement de solutions énergétiques durables, notamment celui des énergies renouvelables ou des substituts aux énergies fossiles. Eu égard en particulier aux importants développements des énergies renouvelables, les outils de prospective permettent d'éclairer les choix face aux nouveaux enjeux qui émergent, e.g.

comment allouer une production électrique renouvelable et intermittente élevée pendant des périodes à faible consommation énergétique, ou comment pallier les périodes à faible production renouvelable pendant la nuit ou en l'absence de vent. Face à ces enjeux, les technologies power-to-gaz (P2G) émergent comme une solution très prometteuse, car à travers l'utilisation de l'électricité produite pendant des périodes à forte irradiation solaire et/ou en présence de vents forts avec une faible consommation électrique, elle permet de produire d'autres vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène. Les produits P2G permettent également de couvrir les besoins énergétiques des secteurs où l'électrification est difficilement opérable. C'est le cas notamment des poids lourds ou du secteur industriel. La prospective s'avère alors particulièrement intéressante pour étudier les effets du développement de ces technologies sur l'évolution du système énergétique et leurs interactions avec d'autres solutions visant à faire face à l'intermittence de certaines technologies, e.g. avec le développement des batteries électriques.

Tous les enjeux mentionnés précédemment s'appliquent particulièrement aux territoires car ils présentent d'importantes ressources énergétiques renouvelables. Ainsi, pour étudier leur transformation sur le long terme et intégrer ces problématiques spécifiques, les modèles de prospective ont de plus en plus été développés en ce sens. Pour autant, l'étude prospective de territoires infranationaux présente plusieurs défis, et notamment celui d'intégrer les caractéristiques du système énergétique à analyser en fonction des données disponibles. En effet, le secteur de l'énergie étant un enjeu étudié largement au niveau international et national, les données de consommation et de production énergétique sont généralement agrégées. Il s'avère donc difficile d'identifier la part qui correspond à chacun des territoires, en particulier quand il s'agit de la demande finale d'énergie par secteur d'activité et par service énergétique. Un tel niveau de détail de données est important car il permet de mieux intégrer les caractéristiques rendant unique le territoire et permet de mieux identifier les options de substitutions qui contribueront à la décarbonation du système.

Ainsi, l'objectif de ce travail de thèse réside dans l'étude du système énergétique d'une région française, la région SUD PACA, afin de discuter les stratégies et orientations de cette dernière en matière de transition énergétique et d'économie circulaire. Pour cela, nous avons construit un modèle de prospective représentant le système énergétique de cette région, sur la base du paradigme TIMES, une famille de modèles bottom-up d'optimisation linéaire développée à l'origine dans le cadre de l'Agence Internationale de l'énergie pour investir ces questions. L'analyse sera effectuée à travers l'implémentation de différents scénarios qui expriment de possibles trajectoires contrastées selon les objectifs que pourrait viser ce territoire.

L'originalité de ce travail réside particulièrement dans la façon dont l'outil de modélisation a été construit, selon un découpage du système énergétique territorial permettant, d'abord, de faire une distinction entre les consommations énergétiques sur lesquelles les politiques régionales pourraient avoir une influence directe vers la décarbonation. Ensuite, le découpage territorial permet de distinguer les territoires à forte consommation et ceux à faible consommation énergétique, et de mieux analyser les synergies entre les territoires. Notamment, il est alors question d'étudier où il apparaît plus pertinent de développer les énergies renouvelables, dans les zones à forte consommation ou dans les zones à fort potentiel énergétique. Le modèle développé permet également d'étudier le rôle des différentes technologies de décarbonation et de bien repérer les émissions à chaque étape de la chaîne de consommation et production. Enfin, le modèle intègre une perspective d'EC pour le

développement du système énergétique régional, ce qui n'a pas été étudié en détail dans d'autres recherches académiques.

Ce travail est structuré de la façon suivante :

1. Le premier chapitre analyse l'émergence des modèles énergétiques comme outils d'aide à la décision et montre comment la modélisation prospective trouve sa place comme démarche appliquée à l'étude des systèmes énergétiques de demain. Nous avons également identifié les différents modèles développés suivant l'évolution des problématiques, notamment celles relatives à l'interaction entre systèmes énergétiques et environnement-climat. Nous avons également mis en avant comment ils sont passés de l'étude de problématiques relatives à l'énergie au niveau mondial ou national à celles des territoires infranationaux.
2. Dans le second chapitre, nous montrons dans un premier temps, comment évolue au cours du temps la gouvernance des systèmes énergétiques en France et en particulier le rôle joué par l'Etat et les collectivités territoriales. Puis, nous présentons les différentes politiques énergétiques, climatiques et d'économie circulaire françaises avant de nous concentrer sur la région SUD PACA et la manière dont elle se positionne quant à ces dernières. Dans ce chapitre nous montrons en particulier que les collectivités territoriales sont devenues des acteurs jouant un rôle clé au moment de matérialiser la transition énergétique et le passage vers des territoires plus respectueux de l'environnement.
3. Le troisième chapitre se concentre sur le concept d'économie circulaire (EC). Ainsi, reposant sur une importante revue de littérature, tant académique qu'issue des politiques publiques, l'objectif visé est de comprendre comment ce concept est apparu et comment il a évolué au cours du temps. De cette manière, il vise à identifier ses origines, ce qui a influencé sa conception et comment il a été intégré aux politiques environnementales de divers gouvernements dans le monde. Nous explorons ensuite ses principes, ses caractéristiques et ses objectifs et finissons par en proposer une définition.
4. Le quatrième chapitre est destiné à détailler comment nous avons construit l'outil de modélisation prospective TIMES SUD PACA. Nous détaillons en particulier le découpage du système énergétique régional suivant les caractéristiques du système énergétique du territoire, les caractéristiques techniques et structurelles du modèle, les hypothèses retenues et les données utilisées. La modélisation très originale choisie pour représenter le système énergétique régional suit un découpage de ce dernier qui permet de bien différencier les zones à haute et faible consommation énergétique et de bien détailler les potentiels, la consommation et production énergétique pour chacune d'elles. Le modèle intègre des technologies émergentes dans la transition énergétique (e.g. technologies P2G, etc.) ce qui permet d'analyser comment mieux capter les potentiels renouvelables de chaque zone et de bien intégrer une perspective d'EC pour le développement du système énergétique, à savoir des technologies P2G, des batteries et la capture et l'utilisation de carbone, etc. La modélisation permet également de bien identifier les émissions de gaz à effet de serre à chaque étape de la chaîne de consommation et de production, en particulier pour bien identifier les émissions au moment d'injecter l'hydrogène au réseau de transport de gaz. Ainsi, le modèle permet d'étudier les options de transition énergétique et d'économie circulaire du système énergétique de cette région.
5. Dans le cinquième et dernier chapitre, nous présentons dans un premier temps les six scénarios construits pour analyser les possibles trajectoires de décarbonation du système

énergétique de la région. Parmi les principales questions que nous cherchons à étudier, nous pouvons citer comment les ressources énergétiques de la région pourront être développées, avec quelles technologies et dans quelles zones ; zones à forte consommation ou zones à faible consommation ? En ce sens, comment les différents territoires vont interagir entre eux pour couvrir les besoins énergétiques régionaux et est-ce que les technologies P2G permettront une meilleure mobilisation des potentiels énergétiques de la région ? Quel sera l'effet de l'application d'une perspective d'EC sur l'évolution du système énergétique régional ? Finalement, nous analysons et discutons les résultats obtenus.

Des recommandations quant aux stratégies que la région SUD PACA pourrait mettre en œuvre afin de remplir les objectifs qu'elle s'est fixés pour les années à venir en matière de transition énergétique seront formulées dans la conclusion. Les limites et les perspectives de poursuite et approfondissement de ce travail seront également présentées.

Chapitre 1 – Les modèles énergétiques : Evolution des enjeux

L'énergie a été et est encore l'un des facteurs déterminants du développement humain. Le contrôle et la domestication du feu à partir de la combustion du bois ont été une découverte primordiale faite par les premiers ancêtres de l'homme, qui a contribué à leur évolution en facilitant la chasse, la protection contre les prédateurs et les conditions climatiques, et en permettant la cuisson des aliments (Wrangham & Carmody, 2010). Vers la révolution néolithique, 9 000 années avant notre ère, la découverte de l'agriculture a exigé de grands efforts pour cultiver la terre, les Hommes ont alors profité de l'énergie fournie par les animaux pour faciliter les tâches quotidiennes. 1 000 ans avant J.-C., le charbon a commencé à être utilisé pour remplacer la biomasse qui, dans certaines régions du monde, a commencé à être surexploitée. Ensuite, l'énergie éolienne fut utilisée comme force pour déplacer les bateaux à voile permettant des voyages plus longs et des échanges maritimes et fluviaux. Cette énergie fut aussi utilisée pour faire tourner des moulins tout comme l'énergie hydraulique. Vers le quatrième siècle avant J.-C., de premiers usages du gaz naturel apparaissent en Chine comme combustible pour l'éclairage. Les ressources énergétiques sont ainsi déjà relativement variées et leur usage évolue peu à peu au grès des inventions et des besoins. Puis, bien plus tard, vers la moitié des années 1700, l'invention des machines à vapeur fait exploser l'utilisation du charbon et stimule la révolution industrielle et la croissance économique, les marchandises pouvant être produites en plus grandes quantités et plus rapidement et étant possible de parcourir des distances plus grandes en moins de temps. Vers les années 1850, l'invention des moteurs à combustion interne, plus efficaces que les machines à vapeur, remplacent l'utilisation du charbon dans certaines activités de production, et le pétrole prend place comme énergie privilégiée dans le secteur du transport. Par la suite, la découverte de l'électricité amène à de nouveaux usages énergétiques et sa production reste très fortement dépendante des énergies fossiles.

L'utilisation accrue des énergies fossiles permise par ces développements techniques a donc procuré de nombreux avantages aux êtres humains et a contribué à transformer leurs modes de vie. Elle a favorisé une croissance économique plus rapide mais elle-même de plus en plus intensive en énergies, entraînant de fait différents problèmes auxquels la société s'est confrontée, jusqu'à aujourd'hui. L'un des principaux défis a toujours été l'accès aux ressources, chaque région de la planète possédant des ressources énergétiques différentes, entraînant par là-même des tensions géopolitiques. Bien allouer les ressources est aussi un problème courant dans le domaine de l'énergie, c'est-à-dire combien d'énergie et laquelle faut-il utiliser pour les différentes activités. En outre, une mauvaise gestion des ressources peut conduire à d'autres problèmes comme c'est le cas par exemple de la surexploitation de la biomasse qui conduit à la déforestation dans certaines parties du monde. L'utilisation croissante des ressources énergétiques suscite également des inquiétudes quant à leur épuisement mais aussi l'augmentation des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre qu'elle provoque, affectant alors fortement le climat. Dans ce contexte, une problématique majeure s'impose, celle de connaître comment les différents choix que nous faisons pourraient affecter l'ensemble du système à l'avenir, en particulier quand il s'agit d'évoluer vers une trajectoire plus responsable avec l'environnement que notre usage de l'énergie remet en cause.

Au regard de ces questionnements et enjeux, la modélisation énergétique émerge comme une option qui permet d'étudier et analyser les systèmes énergétiques et de donner des réponses aux différents problèmes énoncés précédemment. Dans le cadre de la construction de systèmes énergétiques

futures, la prospective apparaît quant à elle comme l'approche permettant d'explorer l'avenir des systèmes énergétiques en fonction de décisions prises, d'actions envisagées et d'objectifs proposés, tout comme elle permet d'en élaborer de nouveaux. La prospective n'est pas une approche qui cherche à prédire ou prévoir le futur, mais plutôt à envisager les futurs possibles afin de les construire. De cette façon, la prospective a peu à peu trouvé une place déterminante dans l'étude des systèmes énergétiques à l'aide de modèles et son application n'a cessé de prendre de l'ampleur, devenant une démarche incontournable d'aide à la prise de décisions.

Ainsi, ce chapitre vise dans un premier temps à analyser l'émergence des modèles énergétiques comme outils d'aide à la décision et à regarder comment la prospective trouve peu à peu sa place comme démarche déterminante pour l'étude des systèmes énergétiques de demain. Nous voulons aussi identifier les outils qui ont été utilisés et regarder comment ils évoluent pour permettre l'étude des problématiques actuelles, notamment celles relatives à l'interaction entre systèmes énergétiques et environnement-climat. Nous cherchons également à identifier comment ces études sont passées des problématiques relatives à l'énergie au niveau mondial ou national à la prise en compte des territoires infranationaux.

1.1. La modélisation énergétique et prospective

La prospective, sous sa forme moderne d'anticipation, émerge quasiment simultanément en France et aux États-Unis à la fin de la seconde guerre mondiale, guidée par cette même ambition de construction d'un avenir souhaitable, mais suivant deux orientations différentes (Polère, 2012). Aux États-Unis, c'est dans un contexte de structuration des sciences et de la technologie et d'enjeux géostratégiques qu'elle émerge, tout d'abord, avec le rapport de William Ogburn « Commission présidentielle de recherche sur les tendances sociales » en 1933, puis celui sur « les tendances technologiques et la politique gouvernementale » commandé par Franklin Roosevelt (Futuribles, n.d.). Ce n'est cependant qu'en 1947 que la prospective « moderne » prend de l'ampleur après que l'armée de l'air américaine ait financé une étude sur les progrès techniques qui pourraient avoir un intérêt militaire et ait mis en place en 1948 un projet sur les aspects non terrestres des conflits internationaux, nommé projet Rand. La Rand Corporation est alors créée et, à l'instar du Hudson Institute créé plus tard en 1961, développe plusieurs méthodes appliquées actuellement dans les recherches de prospective comme la méthode Delphi et surtout la méthode des scénarios. Parallèlement à ce mouvement, en France, la prospective émerge également. Orientée par des objectifs de planification elle s'appréhende davantage comme la recherche de repenser l'avenir, comprendre la société, envisager son éventail d'évolutions possibles, sur fond de critique de la décision. En 1950, Gaston Berger réinvente le terme de prospective dans son article « Méthode et résultats » (Berger, 1960) où il s'interroge sur la façon de prendre des décisions et de comment regarder l'avenir, l'amenant à formaliser la méthode prospective. La pratique qui en sera issue se diffusera alors dans l'administration française et les grandes entreprises. Ainsi, selon Gaston Berger, la prospective est définie de la manière suivante :

« La prospective n'est ni une doctrine, ni un système. Elle est une réflexion sur l'avenir, qui s'applique à en décrire les structures les plus générales et qui voudrait dégager les éléments d'une méthode applicable à notre monde en accélération. [...] Elle ne vise pas à satisfaire notre curiosité, mais à rendre nos actes plus efficaces. Elle ne veut pas deviner, mais construire. Ce qu'elle préconise, c'est une « attitude pour l'action. [...] Se tourner vers l'avenir, au lieu de regarder le passé n'est donc pas simplement changer de spectacle, c'est passer du « voir » au « faire » ».

La prospective ne prétend donc pas prévoir quoi que ce soit, elle se concentre plutôt sur l'action, elle est liée à une réflexion stratégique qui comprend une vue interdisciplinaire unissant plusieurs domaines scientifiques. Il s'agit donc d'élaborer des scénarios cohérents à moyen-long terme, envisager l'avenir qu'il faut construire et explorer les options permettant d'y arriver. Il s'agit de « *savoir dans quelle direction l'on marche et s'assurer de l'endroit où l'on va poser le pied pour le prochain pas* » (Berger, 1964). Décrire des futures possibles est l'objectif d'une prospective, ainsi que d'identifier les ressources nécessaires et les changements de tendances à construire pour arriver à l'objectif désiré. Le principal levier de la prospective est de fait la construction de scénarios (Afriat, n.d.) qui permettent d'explorer les avenir.

Sur la base de cette introduction sur la prospective, nous allons dans cette section nous concentrer sur la modélisation énergétique et ses premières phases d'évolution.

1.1.1. Premiers développements des modèles énergétiques et premières applications de prospective

Les premiers modèles énergétiques¹ ont été développés dans les années 1950, principalement afin d'étudier les systèmes électriques, et notamment leur expansion, l'optimisation des choix d'équipements et d'investissements, ceci afin de satisfaire la demande croissante d'électricité à l'échelle des pays (Bessiere, 1969). Les modèles suivaient plutôt des démarches de planification opérationnelle, la prospective quant à elle commençait à être prise en compte. Nous citons ici par exemple, le cas d'EDF qui, à travers différents modèles de planification opérationnelle ainsi que des modèles de prospective, comme le modèle de « Trois Plans » ou le modèle « Investissement 85 », guide alors sa politique d'investissements et ses choix énergétiques à long terme dans le secteur électrique (Bessiere, 1969). Les modèles énergétiques s'utilisaient aussi pour étudier la consommation d'énergie et d'anticiper la demande future, afin notamment de pouvoir planifier la construction de nouvelles centrales de production d'électricité. La prévision et la prospective se complètent alors dans des travaux exploratoires des systèmes énergétiques. Au début, les études analysant la demande ne se concentraient pas uniquement sur la demande d'énergie qui était intégrée dans la demande de biens et services et était alors considérée comme les autres besoins de la société (Wirl & Szirucsek, 1990). Ces modèles de demande s'appuyaient sur des études d'ingénierie et d'économétrie.

Dans les années 1960 jusqu'au début des années 1970, la croissance économique est forte et conduit à une augmentation de la consommation énergétique. Les énergéticiens, organisations non gouvernementales et décideurs publics se posent alors de nouvelles questions concernant l'évolution et le fonctionnement des systèmes énergétiques de demain. Ils recourent aux modèles énergétiques pour la formulation et l'analyse des politiques et cherchent à construire les systèmes énergétiques de demain (Hoffman, 1976). Ces modèles se concentraient principalement sur l'offre et la demande d'une forme d'énergie ou d'un combustible unique comme l'électricité, le pétrole ou le gaz naturel (Voss, 1984). L'étude des modèles intégrant un seul type d'énergie limitait les analyses et les recommandations des politiques car ces modèles ne prenaient pas en compte l'interaction des différents combustibles pour satisfaire la demande d'un même service énergétique (Ibid).

¹ Nous parlons de modèles énergétiques pour faire référence aux outils de modélisation en tant que logiciels de calcul ou cadres de modélisation, qui génèrent des modèles de systèmes énergétiques.

(Charpentier, 1974, 1975; Charpentier & J.-M. Beaujean, 1976; J.-M. Beaujean & Charpentier, 1978), ont fait une compilation des modèles développés entre 1968 et 1975 (201 modèles au total), avec un résumé des méthodologies déployées et des problèmes abordés. Les modèles recensés dans cette compilation varient considérablement quant à leurs objectifs et problématiques : ils s'intéressent à un large éventail de problèmes pour des zones géographiques de dimensions différentes et emploient une grande diversité de méthodes issues de plusieurs disciplines scientifiques. Parmi ces modèles, il est possible de faire une distinction entre les modèles développés avant et après la crise pétrolière (section 1.1.2). Les études des systèmes énergétiques datant d'avant 1973 se concentraient principalement sur l'offre pour satisfaire la demande d'un seul type d'énergie, notamment celle de l'électricité, du gaz et du pétrole. Les analyses étaient particulièrement axées sur le secteur de la production d'électricité, pour déterminer le bon fonctionnement du système et améliorer sa performance, évaluer les possibles expansions et calculer les rendements des nouvelles technologies de production à des échelles nationales. Jusque-là, dans ces modélisations énergétiques, le problème se situait au niveau national (Kavrakoglu, 1987) car l'énergie constituait davantage une ressource stratégique de l'Etat qui était le garant de la sécurité d'approvisionnement. En outre, peu d'attention étant portée à l'époque aux économies d'énergies à exploiter du côté de la demande, la construction de grandes infrastructures était principalement favorisée (Hulscher, 1980). Quelques premières études portaient sur l'analyse des émissions de polluants atmosphériques produites par les usages énergétiques, notamment pour évaluer les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et pour minimiser leur production. Enfin, peu d'études s'intéressaient aux énergies renouvelables en dehors des ressources hydriques qui constituaient la source d'énergie renouvelable la plus prise en compte dans les modèles. On notera cependant parmi les modèles présentés par (Charpentier, 1974, 1975; Charpentier & J.-M. Beaujean, 1976; J.-M. Beaujean & Charpentier, 1978), celui de Kenneth Hoffman de 1972 qui prenait ainsi en compte des ressources renouvelables, solaires, géothermiques et hydriques, comme des ressources potentielles pour produire de l'électricité, au moment d'analyser la structure optimale du système énergétique des États-Unis à moyen terme. En outre, une première analyse menée en 1971 par G. Tinter, a porté sur l'impact d'une diminution de l'utilisation des produits pétroliers en cas de crise en Autriche et son effet sur l'emploi, mettant en avant qu'une décroissance dans l'usage du pétrole impliquerait une réduction de la production et des salaires (Charpentier, 1974). Ainsi, progressivement la prospective a pris une place significative comme démarche pour l'analyse de l'évolution de systèmes énergétiques.

Dans ces premières études de systèmes énergétiques d'avant 1973, les outils utilisés n'étaient pas vraiment mentionnés, cependant ont pu être repérés ceux utilisés par EDF et les compilations faites par (Charpentier, 1974, 1975; Charpentier & J.-M. Beaujean, 1976; J.-M. Beaujean & Charpentier, 1978) ont conduit à identifier le modèle « *T.E.R.A.* » développé par « *Decision Sciences Corporation* » en 1971 pour aider l'évaluation des politiques dans le secteur du gaz dans les États-Unis. Ce modèle appliquait des techniques de simulation et d'économétrie dans une démarche prospective pour analyser l'évolution du système énergétique.

En outre, on trouve en 1972 le premier modèle de prospective globale à partir des résultats duquel s'est fondé le rapport « *Halte à la croissance* » élaboré par (Meadows et al., 1972). Basé sur le modèle « *World 3* », ce rapport cherche à discuter les relations entre les activités humaines et le système planétaire et met notamment en avant qu'une croissance continue n'est pas possible dans les conditions actuelles car les ressources seraient alors épuisées. Il faudrait ainsi viser un système économique stationnaire qui ne serait pas basé sur une croissance infinie. Bien que ce rapport ne parle

pas spécifiquement de l'énergie, ce travail est un des plus célèbres en prospective, et la place comme une démarche exploratoire qui permet la discussion des possibles trajectoires qu'un système peut suivre, et s'agissant de cette étude, suivant différents facteurs de base qui déterminent et, dans leurs interactions, limitent en fin de compte la croissance sur cette planète : la population, la production agricole, l'épuisement des ressources non renouvelables, la production industrielle et la pollution. Cette analyse marque ainsi les prémises des études prospectives du développement durable. Nous parlerons plus en détail du contexte de cette étude dans la section 2.5.1.

Ils ont alors examiné les cinq facteurs de base qui déterminent et, dans leurs interactions, limitent en fin de compte la croissance sur cette planète : la population, la production agricole, l'épuisement des ressources non renouvelables, la production industrielle et la pollution. Ils créent ainsi le modèle « World » et publient le rapport « *The Limits to Growth* » (Halte à la croissance).

1.1.2. Les crises pétrolières des années 1970

Le pétrole est un des principaux moteurs de la croissance économique mondiale et sa demande ne cesse de croître. Ses variations de prix ont un impact important sur les économies qui se basent sur cette ressource. Ainsi, un choc pétrolier, qui se définit comme un phénomène de hausses élevées et rapides du prix du pétrole, a une incidence négative sur la croissance économique mondiale et provoque communément une crise pour les pays qui ne produisent pas ou pas assez cette ressource et qui l'importent donc. Les principales causes d'un choc pétrolier sont d'une part le déséquilibre entre l'offre et la demande et d'autre part les tensions géopolitiques. Ces hausses de prix contribuent alors notamment à l'accroissement de l'inflation et au ralentissement de l'activité économique des pays importateurs de pétrole. Deux chocs pétroliers sont en particuliers survenus au XX^e siècle et ont constitué un tournant par les bouleversements qu'ils ont entraînés.

En 1960, l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) est créée pour équilibrer le pouvoir des grandes compagnies pétrolières et augmenter le prix du pétrole. Avant 1970, le prix du baril de pétrole était alors très stable. En 1971, la demande énergétique des Etats-Unis croît rapidement et la production de pétrole arrive à son point maximal, les conduisant à importer du pétrole pour satisfaire leur besoins. La même année le 15 août, en raison de la fuite de capitaux américains vers les marchés européens et de la diminution des réserves en or, le président Richard Nixon annonce unilatéralement la suspension de la convertibilité du dollar en or abandonnant ainsi le système de Bretton Woods, ce qui dévalue immédiatement la devise américaine (Vie Publique, n.d.). Les revenus des pays exportateurs, le Moyen-Orient, chutent alors et ces derniers réagissent en indexant le prix du baril de pétrole au cours de l'or. Il en résulte une hausse du prix du pétrole de \$ 1,8 en 1971 à \$ 2,5 en 1972, un de prémises du premier choc pétrolier en 1973 (Stratta, 2016). En effet, le 6 octobre de 1973, la guerre du Kippour éclate au Moyen-Orient entre l'État d'Israël et une coalition d'États Arabes menée par l'Égypte et la Syrie. Les pays membres de l'OPEP décident alors un embargo sur les livraisons de pétrole pour les pays qui soutiennent Israël dans cette guerre (les États-Unis, les Pays-Bas, le Portugal et l'Afrique du Sud). L'OPEP décide de plus de réduire la production de cinq millions de barils par jour, soit de 7% de la production mondiale. En trois mois, le prix du pétrole quadruple passant de \$ 11,65 à un pic de \$ 18. La hausse des prix se reflète dans l'économie, les coûts de production de nombreux produits sont affectés. L'embargo est levé après cinq mois, le marché se stabilise grâce à l'offre qui

redevient rapidement excédentaire (Connaissances des énergies, 2011). Les pays développés sont en pleine stagflation : la croissance économique est nulle et est accompagnée d'une forte inflation.

Le second choc pétrolier éclate en 1979 à cause de la révolution iranienne et le début de la guerre Iran-Irak. L'Arabie Saoudite décide de diminuer sa production de 1 million de barils par jour afin de réduire l'offre. C'est le point de départ du second choc pétrolier. La déstabilisation de ces deux grands pays producteurs de pétrole entretient les tensions sur le marché pétrolier au début des années 1980. Le prix du pétrole augmente en raison de la panique qui s'empare du marché tout entier. Le prix du baril passe alors de \$ 13 dollars à \$ 40 dollars en neuf mois.

Ce bref rappel des chocs pétroliers dans l'histoire du XXe siècle nous conduit à regarder les effets négatifs sur les économies et de fait sur les systèmes énergétiques qu'ils ont également affectés. Dans la section suivante, nous allons regarder comment ces contextes économiques ont impacté les études de systèmes énergétiques et comment les modèles et la prospective ont davantage été utilisés pour répondre aux nouveaux enjeux apportés par cette crise pétrolière.

1.1.3. La modélisation énergétique après la crise pétrolière de 1970

Avec la crise pétrolière de 1973, les pays importateurs de pétrole prennent conscience de leur dépendance, et surtout de leur vulnérabilité, face au contexte géopolitique qui impacte le commerce international et aux variations des prix des vecteurs énergétiques (en particulier le prix du pétrole), qui constituent alors de véritables menaces pour la sécurité de l'approvisionnement énergétique (Goldemberg, 1987). Cette crise a aussi lancé la mise en exergue de questionnements sur la finitude des ressources fossiles et l'importance de trouver des moyens de substitution (Häfele, 1981). Il a ainsi marqué le domaine de l'énergie et a produit une explosion de développement de modèles énergétiques (Voss, 1984; Wirl & Szirucsek, 1990). En effet, dans les compilations faites par (Charpentier, 1974, 1975; Charpentier & J.-M. Beaujean, 1976; J.-M. Beaujean & Charpentier, 1978) il est possible de remarquer l'augmentation importante d'études réalisées après le choc pétrolier de 1973 (139 modèles) par rapport aux modèles développés auparavant (43 modèles).

L'effet de la crise pétrolière est si important que divers organismes internationaux sont créés pour fournir des conseils pour une prise de décision mieux informée, pour la formulation de politiques énergétiques fiables et pour mieux faire face aux déséquilibres dans le secteur de l'énergie à l'avenir. Ainsi, en 1976 est créé le Forum sur la modélisation énergétique (FME / *Energy Modeling Forum* ou *EMF* en anglais) à l'Université de Stanford, il publie son premier rapport en 1977 portant sur la relation entre énergie et économie (Energy Modeling Forum, 1977). En 1977, le « *Programme d'analyse des systèmes de technologie énergétique* » de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) (Energy Technology Systems Analysis Program / ETSAP) est créé dans le but de proposer une plateforme (d'optimisation) commune permettant aux pays membres de l'Agence d'examiner l'évolution de leurs systèmes énergétiques en réponse aux développements technologiques et aux priorités politiques, conduisant à la plateforme de modélisation « *MARKAL* » puis son successeur « *TIMES* ».

Cette crise pétrolière ouvre donc tout un éventail de préoccupations et d'incertitudes sur le domaine de l'énergie. Mais également, l'utilisation des modèles énergétiques augmente considérablement avec une place plus importante de la prospective comme démarche d'exploration des trajectoires du système énergétique. Ainsi naissent les premiers modèles énergétiques de prospective globaux (Wirl & Szirucsek, 1990). On trouve par exemple le modèle *MARKAL*, utilisé pour évaluer diverses

technologies et leur rôle dans le secteur de la production dans des systèmes énergétiques multinationaux (mais aussi nationaux), ou le modèle MESSAGE développé par l'IIASA (Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués) pour étudier les perspectives à plus long terme des transitions vers des systèmes d'approvisionnement énergétique dans un monde aux ressources limitées (Voss, 1984). Les modèles de prospective commencent aussi à analyser les fluctuations du marché pétrolier et l'impact de l'évolution des productions et des prix de l'énergie, notamment du pétrole, sur l'économie et les systèmes énergétiques à l'échelle des pays. Aux Etats-Unis, on trouve par exemple le modèle « *PIES* » développé en 1973. Cet outil a servi à plusieurs occasions dans des travaux de planification énergétique (Energy Research and Development Administration DC., 1977). D'autres modèles énergétiques sont construits pour l'analyse des politiques de commerce mondial d'énergie, comme le modèle « *LINK* » élaboré par l'Université de Pennsylvanie en 1973. On trouve également un intérêt croissant pour étudier l'impact des politiques menées au sein de l'OPEP sur l'offre et la demande de produits pétroliers, par exemple en explorant les conséquences de la variation des prix de l'énergie sur la demande (Hoffman, 1976; Manne. et al., 1979)

Une autre problématique abordée par les modèles de prospective énergétique est l'allocation des ressources, autrement l'analyser des problèmes d'extraction des sources d'énergie primaire, leur transformation en sources d'énergie secondaire et leur attribution à la satisfaction de la demande d'énergie finale. La question ici est celle de déterminer quelles ressources énergétiques doivent être produites et utilisées, en quelles quantités et quand, pour répondre aux demandes des différents secteurs (Kavrakoglu, 1987). À cette époque, ces modèles se concentraient principalement sur la substitution du pétrole. Pour remplacer le pétrole dans la production d'électricité, plusieurs pays ayant choisi l'énergie nucléaire comme une des options, les modèles énergétiques de prospective ont alors analysé l'effet d'une telle substitution sur l'ensemble du système énergétique et sur la réduction de la consommation du pétrole. On trouve ici, par exemple, le modèle « *WASP* » développé par l'AIEA (l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique / *International Atomic Energy Agency* ou *IAEA* en anglais) appliqué aux études nationales de planification de l'énergie nucléaire, ou le modèle « *REM* » qui examine les demandes de réacteurs nucléaires, d'uranium brut et les exigences du cycle du combustible par l'industrie américaine des services publics d'électricité au cours des vingt prochaines années, sous un certain nombre d'états possibles du monde (Joskow & Baughman, 1976).

Les modèles énergétiques de prospective étaient alors également destinés à évaluer les technologies de production afin d'aider à la planification des investissements et des politiques de développement du secteur énergétique. Ils visaient le mix optimal de technologies de production d'énergie nécessaires pour satisfaire la demande future d'énergie, en fonction de caractéristiques techniques et économiques. Il s'agissait ici plutôt de répondre aux questions de quelle capacité installée faut-il développer et quand. A cette époque-là, le modèle *Markal* est un des principaux modèles utilisés à cette fin (Rath-Nagel & Voss, 1981; Voss, 1984). Certains analysaient l'ensemble du système énergétique et évaluaient le rôle des nouvelles technologies et les possibilités de substitution entre les différentes énergies. La substitution était fortement dépendante des caractéristiques des appareils utilisés pour les usages finaux tels que le chauffage des locaux, la climatisation et le transport automobile (Hoffman, 1976). Il était par exemple possible d'analyser les flux d'énergies et les technologies développées. Dans ce genre d'études, les technologies utilisant des énergies renouvelables commençaient à être prises en compte comme une option pour le développement des systèmes énergétiques. L'énergie solaire et la géothermie notamment constituaient des options pour couvrir la croissance de la demande d'énergie. Pour autant, leur intégration et analyse n'était pas

l'objectif principal de ces études. Enfin, les modèles « *BESOM* » et « *EFOM* » ont été utilisés pour l'analyse de l'effet des politiques sur les trajectoires possibles des systèmes énergétiques, principalement à l'échelle nationale.

On notera que l'échelle des analyses commence également à se désagréger à un niveau infranational. C'est par exemple le cas de la recherche élaborée par J.D. Khazzoom de 1973 qui divise le système énergétique du Canada selon les provinces, ou encore de celle de W.E. Mooz de 1975, qui étudie le système énergétique de la Californie en le décomposant en cinq régions. Ce découpage visait à mieux capter des caractéristiques spécifiques des systèmes énergétiques des territoires infranationaux, comme c'est le cas par exemple du modèle « *SRI-Gulf* » aux États-Unis, qui présente des données d'utilisation finale pour 9 régions de recensement et des données de sortie pour 20 régions d'approvisionnement. Les approvisionnements et les demandes sont équilibrés simultanément à chaque instant sur l'horizon de planification de 50 ans (Manne. et al., 1979).

On note également un intérêt croissant pour l'étude de la relation entre énergie et économie, principalement pour analyser les effets des variations de prix de différentes énergies sur le PIB, l'emploi ou sur le bien-être. Ce genre de modèle peut établir une interconnexion entre un modèle énergétique et un modèle économique. C'est le cas du modèle « *ETA-MACRO* » qui a été utilisé pour étudier principalement l'interdiction de centrales nucléaires civiles supplémentaires aux États-Unis et l'effet sur la croissance économique du pays à long terme. Un autre modèle de ce genre est « *PILOT* » développé à l'Université de Stanford en 1977, conçu pour mesurer à travers des scénarios l'impact sur le niveau de vie de diverses décisions politiques touchant le secteur de l'énergie (T. J. Connolly et al., 1977).

Ainsi, lors de cette première période de modélisation, nous avons pu identifier les différents enjeux étudiés à l'aide de la modélisation et nous avons pu observer un recours important à la modélisation prospective comme démarche exploratoire des systèmes énergétiques. Ainsi, avant 1973, les modèles énergétiques sont principalement appliqués à l'optimisation de la croissance des systèmes électriques et de leurs composants (le réseau de transport et de distribution entre autres). Ils permettent également d'analyser les systèmes énergétiques pour couvrir de manière optimale la demande, d'évaluer la performance des technologies, de prévoir la demande d'énergie, d'estimer les ressources énergétiques disponibles et, plus largement, d'étudier la relation entre économie et énergie. La prospective commence à être appliquée à l'étude de l'effet des choix technologiques sur l'évolution du système. Après la crise pétrolière, la prospective est davantage considérée comme une démarche à suivre pour explorer l'évolution des systèmes énergétiques et mieux concevoir les systèmes énergétiques de demain. Les modèles commencent à intégrer dans leurs analyses les questions de substitution et de réduction de la consommation des énergies fossiles dans le secteur de la production, et à étudier l'impact des variations des prix et des différentes politiques sur la consommation de pétrole. Il y eut aussi un intérêt croissant à développer des modèles mondiaux pour approfondir les connaissances du marché pétrolier, l'effet des variations de prix des énergies sur l'économie et mieux comprendre les échanges énergétiques entre les différentes régions du monde.

Dans le Tableau 1, nous proposons un récapitulatif des enjeux (par champ d'application) étudiés par les modèles énergétiques avec un exemple d'outils capables d'étudier ce genre de sujets et des exemples de recherches appliquées pour chaque catégorie.

Tableau 1 : Récapitulatif des enjeux abordés par les modèles énergétiques avec un exemple d'outils utilisés et de recherches associées pour chaque catégorie

	Champ d'application	Description	Outils de modélisation	Exemples
1	Demande	Ces modèles ont comme objectif de prévoir la demande future d'énergie soit d'électricité ou de tous les secteurs confondus.	<ul style="list-style-type: none"> • ETA 	(Manne. et al., 1979)
2	Système électrique	<p>L'objectif de ces recherches est d'analyser le secteur de l'électricité et les préoccupations associées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'optimisation du réseau électrique et les développements futurs du réseau • La planification de l'expansion et de la production des centrales électriques • Les choix des énergies pour la production d'électricité • La performance du système électrique 	<ul style="list-style-type: none"> • EFOM • Three Phase Model • Investment 85 • REM 	<p>(Finon, 1974)</p> <p>(Bessiere, 1969)</p> <p>(Anderson, 1972)</p>
3	Secteur	<p>Ces modèles analysent de manière détaillée un secteur de l'économie, indépendamment des autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Énergies utilisées pour couvrir la demande du secteur spécifique 	<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL 	(C. Wene, 1980)
4	Système énergétique et environnement	<p>Ces modèles prennent en compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les effets de la consommation d'énergie sur l'environnement, y compris la mesure des émissions • Comment l'ensemble des normes environnementales affecte le marché de l'énergie et le choix de l'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • EFOM • MESSAGE • LEAP 	<p>(Agnew et al., 1979)</p> <p>(Häfele, 1981)</p>
5	Économie et énergie	<p>Ils étudient :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'exploration des effets du choix de l'énergie sur l'économie en termes d'emploi, de croissance économique, de commerce • Comprendre la concurrence et la structure du marché 	<ul style="list-style-type: none"> • ETA-MACRO • PILOT 	<p>(Manne., 1981)</p> <p>(Dantzig & et al., 1978)</p>

6	Prix de l'énergie	<p>Ces modèles sont axés sur les conséquences des prix de l'énergie sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le choix de l'énergie pour produire de l'électricité • La production d'énergies primaires • La sécurité d'approvisionnement • La politique des prix des produits énergétiques 	<ul style="list-style-type: none"> • SRI • PIES 	<p>(E. G. Cazalet, 1974)</p> <p>(Federal Energy Administration, 1974)</p>
7	Systèmes énergétiques intégrés	<p>Dans ces modèles, l'ensemble du secteur de l'énergie est étudié :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La performance de l'ensemble du système énergétique • La possible extension du système énergétique • L'allocation des différentes énergies pour couvrir la demande • Le choix des technologies les plus performantes • L'évaluation de politiques 	<ul style="list-style-type: none"> • BESOM • EFOM • MESSAGE • MARKAL • PIES 	<p>(Finon, 1974)</p> <p>(Energy Research and Development Administration DC., 1977)</p>
8	Fourniture d'énergie	<p>Ces modèles considèrent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'efficacité des technologies de production d'énergie finale • L'épuisement des ressources énergétiques et leurs conséquences • La production optimale de ressources énergétiques primaires • La prévision de la production d'énergie primaire 	<ul style="list-style-type: none"> • REM • ALPS • ETA • SRI-GULF Model 	<p>(Patmore et al., 1978)</p> <p>(Keeny & AL., 1977)</p> <p>(Joskow & Baughman, 1976)</p> <p>(Hardie et al., 1972)</p>
9	Système énergétique mondial	<p>Modélise le système énergétique d'un point de vue mondial ou multinational afin d'analyser principalement les flux de matières premières et la production d'énergie primaire</p>	<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL • The Kennedy World Oil Model. 	<p>(Sailor & Rath-Nagel, 1980)</p> <p>(Kennedy, 1974)</p>

Nous avons donc une représentation de l'émergence des modèles énergétiques ainsi que les premiers enjeux étudiés. Des phénomènes géopolitiques ayant bouleversé le secteur énergétique et donné de nouvelles préoccupations aux modélisateurs et décideurs publics, par conséquent, le besoin de nouveaux modèles a drastiquement augmenté pour trouver des réponses adaptées aux nouveaux défis. Bien que la crise pétrolière ait porté l'attention du monde entier sur le marché pétrolier et les conséquences des changements de prix et des ruptures de production, d'autres enjeux affectant les systèmes énergétiques commencent à émerger. À partir de 1970, la prise de conscience des effets des activités humaines, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique, commence à faire partie des débats publics et à être intégrée et étudiée dans différents modèles.

La section suivante vise à apporter une meilleure vision de la manière dont les enjeux environnementaux ont connu un intérêt croissant dans les débats de notre société et à décrire les différents événements qui ont introduit ces enjeux au cœur des études énergétiques.

1.2. La modélisation énergétique et climatique

Cette section s'attachera à décrire le contexte dans lequel les problématiques environnementale et climatique ont été portées sur la scène internationale et comment ce contexte a conduit les modélisateurs à étudier avec plus d'attention la relation entre les systèmes énergétiques et l'environnement et le climat. En outre, elle mettra en lumière comment la prospective comme démarche exploratoire a servi à placer des questionnements environnementaux sur la scène internationale.

1.2.1. La montée des enjeux environnementaux

Comprendre comment les activités anthropiques affectent l'environnement et le climat et comment les être-humains gèrent l'utilisation des ressources occupe les travaux de recherche depuis longtemps. Cependant cet intérêt est grandissant avec la croissance des activités économiques, principalement des activités industrielles, et c'est notamment depuis les années 1950 que l'attention pour ces sujets est la plus marquée. Les études scientifiques se multiplient alors (Mouhot, 2012) et portent principalement sur les effets de la pollution de l'industrie sur l'environnement. Elles mettent en avant les potentielles conséquences catastrophiques si la croissance économique et la pollution se poursuivent au même rythme (Boulding, 1966; Carson, 1962). Face à ces inquiétudes grandissantes, une des premières conférences intergouvernementales portant sur la conservation de la vie et un usage rationnel des ressources est organisée par l'UNESCO en 1968. Cette conférence est la première à viser à réconcilier l'environnement et le développement et a conduit au lancement du programme « *L'Homme et la Biosphère* » (MAB) en 1970 qui intensifie ses actions en faveur de l'environnement émergent dès les années 1940 (Maurel, 2013). S'ensuit, en 1972 à Stockholm, la Conférence des Nations Unies pour l'Environnement Humain, première conférence des Nations Unies sur l'Homme et son milieu qui fait de l'environnement une question majeure. Elle est davantage connue comme le premier Sommet pour la Terre. Cette conférence tente d'instaurer une action internationale pour diminuer les effets nocifs d'une croissance économique qui ne prend pas en compte l'environnement et d'introduire ainsi un modèle de développement économique compatible avec l'équité sociale (début du dialogue entre pays industrialisés et pays en développement) et la prudence écologique. Ce modèle serait alors basé sur la satisfaction des besoins plutôt que sur une augmentation incontrôlée

de l'offre. La Déclaration de Stockholm sur l'Environnement y est adoptée : elle propose 26 principes portant sur la protection et la préservation de l'environnement, la réduction de la pollution de l'indivis mondial (air, eau, océans), la conservation des ressources, le bien-être des peuples, etc. Le Plan d'action pour l'environnement (et ses 109 recommandations) ainsi que plusieurs résolutions y sont également adoptés à cette fin (United Nations, 1972). Une autre grande décision de ce Sommet de la Terre est la création du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) dans l'objectif d'améliorer l'action environnementale et la coordination internationale pour la protection de l'environnement, ainsi que de donner plus de soutien aux études en sciences environnementales. Le PNUE est désormais présenté comme la conscience environnementale du système des Nations Unies (Boudes, 2011). À cette époque, les préoccupations des effets d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère commencent à inquiéter la communauté scientifique (Mouhot, 2012). C'est pourquoi, lors de cette conférence et d'une section portant sur les polluants nocifs pour l'environnement et la santé humaine, est introduit officiellement sur la scène internationale l'existence d'un possible changement climatique. Il est alors demandé aux chefs d'État d'être attentifs aux activités économiques qui contribueraient à un éventuel dérèglement climatique. Les conclusions de la conférence soulignent à quel point il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les possibles effets des polluants qui affectent l'atmosphère et ainsi mieux comprendre si la pollution et les dérèglements climatiques constatés étaient imputables à l'activité humaine (United Nations, n.d.). Les dirigeants mondiaux s'engagent alors à cette occasion à se rencontrer tous les dix ans pour continuer les discussions.

En parallèle, en 1968, l'industriel Aurelio Peccei et le responsable scientifique de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) convoquent une réunion de scientifiques européens à Rome dans l'objectif de faire avancer trois idées fondamentales : une perspective globale et à long terme, le concept de « problématique » et un ensemble de problèmes mondiaux entremêlés, qu'ils soient économiques, environnementaux, politiques ou sociaux (*Club Rome*, n.d.). Ainsi, en 1970 lors de ce premier grand rassemblement, Jay Forrester, professeur des systèmes au MIT, propose d'utiliser les modèles informatiques qu'il a développés pour étudier plus rigoureusement ces problèmes complexes qui intéressent le groupe, donnant les directives pour mener à terme l'étude sur les implications d'une croissance exponentielle débridée. C'est dans ce contexte qu'ils développent le modèle « World », mentionné précédemment, et qu'ils publient le rapport « *The Limits to Growth* » (Halte à la croissance). Ce rapport marque aussi une étape importante dans la lutte en faveur de l'environnement, la principale conclusion de ce rapport remettant en cause le système économique mondial, en montrant que si les activités productives et de consommation, ainsi que l'augmentation de la population et celle de la pollution, se poursuivaient au même rythme qu'alors, la Terre ne serait pas capable de satisfaire les besoins de demain.

Ces premiers événements marquent donc le début de la montée des intérêts internationaux pour des enjeux à l'échelle mondiale et d'une coopération internationale dans le but de réduire les effets nocifs des activités humaines sur l'environnement et d'en limiter les possibles conséquences.

Les études et débats autour des effets des activités humaines sur l'environnement continuent à la charnière des années 1970 et 1980. En 1979, les préoccupations sur les pluies acides en Europe conduisent à la réalisation de travaux sur le comportement des polluants dans l'atmosphère et surtout, en lien avec les transports longue distance. Cela conduit à la signature (en 1979) et adoption (en 1988) de « *la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance* ». En

1980, des inquiétudes croissantes sur les dégâts de la couche d’ozone ont mené le PNUE à recommander de limiter la production et l’usage des chlorofluorocarbones. Ce phénomène en particulier a servi à montrer que les activités humaines pouvaient avoir un impact nocif sur l’environnement à une échelle globale. Ainsi, les recommandations du PNUE ont conduit à la signature de la Convention de Vienne pour la protection de la couche d’ozone en 1985 (elle rentrera en vigueur en 1988) et au Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d’ozone, signé en 1987. Cet accord international a également contribué à la lutte contre les changements climatiques dans la mesure où un grand nombre de substances visées par le Protocole étaient des gaz à effet de serre. Il fut également le premier traité environnemental international à avoir été ratifié par l’ensemble des pays des Nations Unies (et le seul jusque l’Accord de Paris en 2015).

Suivant cette même perspective de mieux déployer des actions en faveur de l’environnement, la Commission Mondiale sur l’environnement et le développement (CMED) est créée en 1983 par les Nations Unies afin d’examiner les problèmes environnementaux dans une perspective de coopération internationale. En 1987, cette commission indépendante publie le rapport Brundtland² intitulé « Notre avenir à tous ». Ce rapport est d’une importance capitale car il introduit le concept de développement durable le plus communément accepté jusqu’à présent : « *un développement capable de répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs* ». Il constitue également le socle de changements attendus à l’échelle mondiale en matière d’environnement. « Un programme global de changement » était d’ailleurs ce qui était demandé à la Commission, sur la base notamment de propositions de stratégies à long terme en matière d’environnement pour assurer un développement durable d’ici à l’an 2000 et au-delà (Brundtland, 1987).

Les enjeux autour du changement climatique prennent de l’ampleur avec de nouvelles études scientifiques qui confirment le réchauffement climatique et la responsabilité humaine (Mouhot, 2012) amenant le G7 à demander la création par l’Organisation Météorologique Mondiale (OMC) et l’appui du PNUE, du Groupe Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat (GIEC / *Intergovernmental Panel on Climate Change* ou *IPCC* en anglais). Le GIEC est ainsi créé en 1988 avec « *pour mission d’évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d’ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d’origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d’éventuelles stratégies d’adaptation et d’atténuation* »³. De cette façon, l’Organisation des Nations Unies reconnaît le changement climatique comme une préoccupation commune de l’humanité. En 1990, le GIEC publie son premier rapport qui conclut que, malgré un certain degré d’incertitude numérique, les activités économiques entraînent une augmentation de la concentration de CO₂ dans l’atmosphère avec comme conséquence une hausse de la température moyenne globale.

Ces deux rapports, celui de Brundtland et du GIEC, ont été les documents référents sur lesquels s’est appuyée la Convention de Rio adoptée en 1992, au cours de la Conférence des Nations Unies sur l’environnement et le développement. Ce troisième Sommet de la Terre, ou Sommet de Rio, a marqué

² Le rapport a été nommé suivant le nom de l’ex-première ministre norvégienne qui présidait alors la commission mondiale pour l’environnement et le développement.

³ Principes régissant les travaux du GIEC :

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc_principles_fr.pdf

une date phare dans la lutte pour le passage vers un développement prenant en compte l'environnement et le climat et dans la prise de conscience de l'importance de ces enjeux au niveau politique. Résultant de cette conférence, la Déclaration sur l'environnement et le développement établit 27 principes pour aider les pays à parvenir à un développement durable, ainsi que les Agenda 21, qui sont des plans d'action pour le déploiement à l'échelle locale (régions, départements, communes ou leurs regroupements) (Vaillancourt, 2002). De même, la Convention Cadre sur les Changements Climatiques (CCNUCC), signée par 154 pays, constitue la base de la lutte contre le changement climatique, avec pour objectif de stabiliser les niveaux des émissions afin de prévenir une hausse de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et d'empêcher des perturbations dangereuses du système climatique (Ouharon, 2018). La CCNUCC repose sur trois principes fondamentaux : le principe de *précaution*⁴, le principe de *responsabilités communes mais différenciées*⁵ et le principe de *droit au développement économique*. Les pays signataires deviennent parties prenantes de ce processus et ses principes associés. Des objectifs de réduction sont établis et différenciés selon différents regroupements de pays. Tout d'abord, les pays signataires, ou *Parties*, sont classés dans l'Annexe I, l'Annexe II et Hors-Annexe I. Les pays de l'Annexe I correspondent aux nations industrialisées et aux pays en transition vers une économie du marché. L'Annexe II intègre les pays de l'OCDE avec l'Union européenne. Finalement, les pays hors-annexe I correspondent aux pays en voie de développement. En outre, les pays de l'Annexe I doivent définir des politiques pour établir ses émissions des gaz à effet de serre en 2000 par rapport à 1990 et ils s'engagent à soutenir les partis hors-annexe I pour établir leurs inventaires d'émissions de gaz à effet de serre et les aider financièrement dans leur adaptation au changement climatique.

1.2.2. Les négociations onusiennes : focus sur la limitation du changement climatique

Les négociations pour protéger la couche d'ozone, et notamment leurs résultats positifs obtenus, ont servi d'exemple pour mettre en place le régime international du climat (Duruiseau, 2016). Ainsi, pour poursuivre les négociations internationales sur la lutte contre le changement climatique sur le long terme, des Conférences des Parties (COP) ont été programmées annuellement. Les premières COP en 1995 et 1996 ont posé les bases pour guider l'établissement de mesures envisageant une réduction des émissions des gaz à effet de serre. La COP 3 en 1997 à Kyoto est un événement charnière dans les négociations du climat car un engagement international visant une réduction des gaz à effet de serre avec la définition d'objectifs chiffrés (destinés à être juridiquement contraignants) est alors atteint (Duruiseau, 2016). Ce protocole instaure des objectifs différenciés par pays au sens où les pays développés et ceux en transition vers une économie de marché (les pays de l'Annexe 1 de la CCNUCC) s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2% entre 2008 et 2012 par rapport à 1990. L'Union européenne s'engage dans ce contexte à une réduction de 8% sur la période et la France quant à elle à stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre. Le parc électrique français reposant fortement sur le nucléaire, le secteur était déjà assez décarboné. Les pays hors-annexe A, c'est à dire

⁴ L'absence de certitude scientifique totale ne doit pas servir d'excuse pour reporter l'action lorsqu'il existe une menace de dommages graves ou irréversibles.

⁵ Tous les pays doivent contribuer à la préservation de l'environnement et à la construction d'un développement durable, cependant « *étant donné qu'ils ont contribué à des degrés divers à la dégradation de l'environnement* » et les moyens inégaux dont disposent les pays, certains Etats doivent apporter une contribution plus forte pour l'atteindre cet objectif.

les pays en voie de développement, ne sont pour leur part pas contraints à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

Pour donner de la flexibilité dans l'atteinte des objectifs de réduction des gaz à effet de serre, trois mécanismes sont prévus par le protocole (UNFCCC, 2017b) :

- Le commerce des quotas d'émissions correspondant aux objectifs quantifiés acceptés et permettant la vente et l'achat de droits d'émissions ;
- La mise en œuvre conjointe. Un pays engagé dans le protocole de Kyoto peut investir dans un projet dont la finalité est la réduction des émissions. Il pourra alors utiliser les réductions des émissions pour remplir son objectif établi dans le cadre du protocole ;
- Le mécanisme de développement propre. Un pays de l'annexe I peut investir dans un projet de réduction des émissions dans un pays hors-annexe I pour gagner un certificat d'émissions qu'il pourra vendre ou utiliser dans l'attente de ses objectifs.

Le protocole de Kyoto a été ouvert pour signature en mars 1998 et devait entrer en vigueur une fois ratifié par 55 pays développés comptant pour 55 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 1990 (Fletcher, 2003). De long débats et d'après négociations ont eu lieu lors des COP 4 en 1998 à 10 en 2004, pour déterminer les aspects techniques de fonctionnement du protocole, ainsi que pour faire aboutir la ratification du protocole par les différents pays. La longueur de ce processus de négociation s'est accentuée par la non-ratification du protocole par les États-Unis en 2001, qui représentaient environ 36 % des émissions en 1990 (Duruiseau, 2016) et qui refusaient de signer un accord ne privilégiant pas les incitations fiscales au soutien à la recherche sur le climat et les technologies qui pourraient contribuer à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Les États-Unis dénonçaient le fait que les pays en développement, principalement la Chine et l'Inde, devaient aussi réduire leurs émissions qui montraient une tendance à la hausse. L'Union européenne ratifiera le protocole en 2002, et la Russie en 2004, permettant ainsi son entrée en vigueur en 2005 (le seuil des 55% d'émissions étant alors atteint). En 2007, l'Australie ratifiera elle aussi le protocole.

À partir de 2005, deux assemblées d'États se réunissent, la première pour le déroulement standard de la COP, et la deuxième, pour les Parties du Protocole de Kyoto, qui s'attelle à régler les détails de sa mise en œuvre et envisager la suite du Protocole avant son arrivée à échéance en 2012 (Tsayem Demaze, 2009). À cet égard, la COP 13 de 2007 à Bali pose les bases de l'adoption d'un nouvel accord pendant la COP 15 à Copenhague en 2009 (Dahan, 2009) qui succéderait au protocole de Kyoto et qui serait mis en place en 2013 (Tsayem Demaze, 2009). Cependant, seul un engagement politique non contraignant d'un certain nombre de pays émane de la COP 15 sans être adopté par elle. Pour autant, l'Accord de Copenhague reconnaît l'importance de ne pas dépasser la hausse de températures au-delà de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle en 2100. Une extension du Protocole de Kyoto est ensuite proposée en 2011 pendant la COP 17 à Durban pour que les engagements des pays se poursuivent jusqu'en 2020. Les discussions commencent à porter sur la mise en place d'un accord global et juridiquement contraignant pendant la COP 21 prévue à Paris pour une entrée en vigueur en 2020 (Duruiseau, 2016). À cet effet, les négociations qui suivirent permirent de donner forme à la prorogation du protocole de Kyoto jusqu'à 2020, ce qui était attendu pendant la COP 18 à Doha. Ensuite, la COP 19 et la COP 20 fondent les bases d'un accord global destiné à couvrir la période post-2020. Les États-Unis n'ont jamais ratifié le protocole de Kyoto, le Canada et la Russie sont sortis du protocole respectivement en 2011 et 2012, et le Japon a montré un désintérêt à s'engager pour une

prorogation du protocole de Kyoto et est sorti du processus. Ces pays refusent alors de signer un quelconque accord qui exclurait les pays en développement dont les émissions augmentent et qui empêcherait une véritable coopération allant vers une réduction des émissions. Par conséquent, la COP 19 de Varsovie de 2013 invite tous les pays à communiquer leurs contributions nationales en termes de réduction de gaz à effet de serre afin qu'elles puissent être évaluées. À la COP 20 à Lima en 2014, sont établis les paramètres provisoires, à arrêter pendant la COP 21, qui devaient guider la construction des contributions individuelles de chaque État et notamment « *refléter le principe de responsabilités communes mais différenciées et des capacités respectives à la lumière de circonstances nationales différentes* » (Marechal, 2016).

En 2015, à la COP 21, les Parties parviennent à un accord historique pour lutter contre le changement climatique et pour accélérer et intensifier les actions et les investissements nécessaires pour un avenir durable à faible niveau d'émissions de gaz à effet de serre. Un accord universel et juridiquement contraignant est atteint : 195 pays le signent et 186 pays représentant 87 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre annoncent leur contribution déterminée au niveau national (CDN) pour lutter contre le changement climatique, ce qui met fin à la différenciation existant jusqu'alors entre pays développés et en développement en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il reste cependant la différenciation en termes de financement des actions de mitigation et adaptation au changement climatique, dans le sens où les pays développés doivent aider les pays en développement. Les pays en voie de développement poursuivent toutefois l'idée de responsabilité historique, contre l'idée de responsabilité partagée avancée par les pays développés (Marechal, 2016). In fine, l'objectif de cet accord est de limiter l'augmentation de la température nettement en-dessous de 2°C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, et de renforcer les efforts pour limiter l'augmentation de température à un maximum de 1,5 °C. Toutefois, force est de constater que la somme des engagements proposés par chaque État dans leur CDN conduit, d'après différents scénarios, à une augmentation de la température se situant entre 2,7 et 3 °C en 2100. Ces efforts ne sont donc pas à ce stade suffisants pour atteindre l'objectif affiché. Ainsi, un bilan des actions doit être effectué en 2023 par chaque État et un mécanisme de révision des objectifs tous les cinq ans (la première aura lieu en 2025) a été mis en place pour conduire à des réductions des gaz à effet de serre plus ambitieuses et en cohérence avec la cible de long terme. L'accord de Paris est entré en vigueur en 2016.

Le succès de l'accord de Paris donne un nouvel espoir à la lutte contre le changement climatique, ainsi les négociations post Paris visent à déterminer plus précisément ses modalités d'application et à définir des détails techniques (Maha, 2018). La COP 22 à Marrakech fixe des points techniques comme la façon de comptabiliser les gaz à effet de serre ou le contenu des contributions individuelles. La date butoir de 2018 est repoussée à 2020 pour la rédaction des modalités de mise en œuvre de l'accord. La COP 23 à Bonn en 2017 a cherché à confirmer la volonté des gouvernements qui souhaitent accroître leurs actions en matière de réduction des gaz à effet de serre, car les engagements proposés par les pays formant le G20 atteignaient alors moins d'un tiers du volume nécessaire pour arriver aux objectifs visés à Paris (Maha, 2018). La COP 24 à Katowice en Pologne a obtenu un succès notable, les Parties étant parvenues à s'accorder sur le « manuel d'application » détaillant les règles de mise en œuvre sur des volets clés de l'accord de Paris : les modalités d'évaluation et de comparaison des contributions climatiques des différents États et leur transmission au secrétariat de Nations Unies sur le changement climatique. Ce manuel, effectif depuis 2020 (CITEPA, 2019), demande d'abord aux différents États de communiquer les actions en train d'être mises en place pour réduire leurs émissions et pour atteindre

les objectifs déterminés dans leur CDN. Il détermine aussi les caractéristiques spécifiques et l'information que les CDN doivent contenir, et décrit comment les pays sont tenus de calculer leurs émissions de gaz à effet de serre et de les déclarer. La COP 25 fut présidée par le Chili, mais à la suite de la crise sociale du pays, la conférence fut délocalisée à Madrid. Cette session des négociations tenta de compléter les règles pour la mise en œuvre de l'Accord de Paris, et discuta plus spécifiquement du fonctionnement du marché du carbone (avec une structure similaire à celle du protocole de Kyoto). Aucun accord n'est finalement atteint (C2ES, 2019). Il était prévu de poursuivre les négociations à la COP 26 à Glasgow en 2020, mais cette dernière fut aussi reportée en 2021 à cause de la pandémie mondiale de COVID-19 qui frappa la planète.

Ainsi, nous avons brièvement relaté l'histoire de la prise de conscience des enjeux environnementaux au niveau international. Tous ces événements sont d'importance vitale pour le secteur de l'énergie car ces nouveaux enjeux s'intègrent et guident désormais son évolution, avec toutes les incertitudes associées. Les études de modélisation, notamment prospective, n'en sont que davantage déterminantes pour explorer et proposer des solutions et objectifs qui pourront changer les trajectoires actuelles, cherchant ainsi à construire un avenir où la consommation énergétique n'est pas synonyme d'irresponsabilité environnementale. Nous trouvons des exemples d'application de la prospective dans le cadre de la proposition des CDN où plusieurs pays analysent les émissions de gaz à effet de serre dans un scénario de référence et l'utilise comme base pour déterminer leurs objectifs de réduction (UNFCCC, 2017a). En France, différents scénarios ont été développés afin d'éclairer la décision publique pour répondre aux obligations internationales et européennes relatives à l'énergie, le climat et l'air (Écologique Ministère de la Transition, 2020). La section suivante vise dans ce contexte à donner un aperçu de comment ces événements ont influencé la modélisation énergétique et comment la prospective entre pleinement comme démarche exploratoire des systèmes énergétiques.

1.2.3. La prise en compte des enjeux environnementaux par les modèles énergétiques

La prise en compte des enjeux environnementaux dans la construction des modèles énergétiques a commencé comme mentionné précédemment, à la fin des années 1960, avec les premiers modèles étudiant les émissions de SO₂ des systèmes énergétiques, la forte concentration de cette molécule dans l'atmosphère étant responsable des pluies acides. Après les différents événements en faveur de l'environnement du début des années 1970, les enjeux environnementaux commencent à prendre davantage de place dans les travaux des modélisateurs et leurs modèles et (Williams, 1978) fait une des premières publications portant sur l'étude des systèmes énergétiques et les émissions de CO₂ associées. Ce travail compile les présentations réalisées au cours de l'Atelier de l'IIASA « Dioxyde de carbone, société et climat » en 1978, où est analysé l'impact d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère sur l'environnement et le climat et les conséquences pour le secteur de l'énergie, principalement en rapport avec le cycle du carbone, mais aussi les diverses stratégies énergétiques et leurs interactions avec les émissions de CO₂. Une autre étude faite par l'IIASA (Häfele, 1981) prend en compte les effets des systèmes énergétiques sur l'environnement et le climat, analyse diverses sources d'énergies renouvelables comme alternatives pour satisfaire la demande future d'énergie. Dans cette étude, quatre approches différentes de modélisation sont utilisées ensemble (MEDEE-2, MESSAGE, IMPACT et MACRO) : chaque modèle applique une méthodologie, poursuit des objectifs d'optimisation différents et fournit des entrées que les autres modèles vont pouvoir utiliser. Toute l'approche de modélisation est hautement itérative.

Peu à peu, l'étude des enjeux environnementaux et climatiques prend de l'ampleur dans les travaux scientifiques sur l'énergie. Les négociations sur le climat conduisent notamment les modélisateurs à divers questionnements, comme par exemple l'impact sur le secteur économique et énergétique du protocole de Kyoto. À ce sujet, le FME réalise un exercice de prospective regroupant 13 équipes de modélisation (13 modèles différents) pour évaluer différents scénarios relatifs au *déploiement du protocole de Kyoto* (Weyant, 1999). L'enjeu était aussi de comparer et identifier des différences dans les résultats obtenus par chaque modèle et de pouvoir expliquer les possibles raisons de ces différences. D'autres modèles se concentrent sur les *mécanismes de flexibilité* établis par le protocole de Kyoto, comme par exemple (Springer, 2003) qui fait une enquête sur 25 modèles ayant réalisé une recherche sur le marché d'échange des permis d'émissions des gaz à effet de serre. Ici nous pouvons trouver des outils tels que « *GRAPE, RICE, POLES, OXFORD* ». (Leimbach, 2003) a également analysé avec le modèle « *ICLIPS* » les préoccupations d'équité qui encadrent les décisions sur l'attribution des droits d'émission. Les modèles énergétiques commencent à analyser les façons d'internaliser les coûts environnementaux à travers des taxes et à comprendre les conséquences sur les niveaux de demande et sur l'économie. Par exemple (Nakata & Lamont, 2001) utilise le modèle META-NET pour analyser l'effet d'une taxe carbone sur le système énergétique japonais. D'autres études portent sur l'impact de *l'efficacité énergétique* pour réduire les émissions de carbone dans la demande finale d'énergie, comme celle du (US-DOE, 1997) qui analyse les diverses technologies existantes par secteur d'activité, le transport, l'industrie et les bâtiments, les analyses sont développés avec le « *Système de Modélisation Énergétique National* ». Cet outil correspond au modèle énergétique-économique de l'Administration de l'Information Énergétique des Etats Unis. Ils utilisent cet outil depuis 1979 pour produire le rapport « *Perspectives Énergétiques Annuelles* ».

Avec l'augmentation du recours aux énergies fossiles dans les années 1980, la pollution atmosphérique devient un problème de plus en plus présent, particulièrement dans les grandes villes où l'activité du transport augmente considérablement (Vaclav, 2010). Les études à l'aide de modèles se proposent d'analyser des stratégies et politiques pour réduire les gaz rejetés par les usages énergétiques, comprendre les changements nécessaires du système énergétique qui pourront guider vers une réduction des émissions, identifier le rôle des différentes technologies propres dans une transition vers un système moins carboné et comprendre les impacts économiques et environnementaux des nouvelles configurations des systèmes énergétiques de demain (Nakata, 2004). Dans cette catégorie, on trouve de modèles tels que « *LEAP, MARKAL ou META-NET* ». Par ailleurs, le secteur de la production d'électricité étant un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre dans le monde (avec une production reposant depuis le début du vingtième siècle sur les énergies fossiles à hauteur de plus ou moins 65 % (IEA, 2020d)), les modèles énergétiques approfondissent la recherche d'alternatives pour produire l'électricité à moindre coût et à moindres émissions. L'énergie nucléaire est considérée par certains comme un levier pouvant aider à atteindre les objectifs de décarbonation et elle capte ainsi de nouveau l'attention des modélisateurs qui s'interrogent sur son rôle dans des scénarios limitant fortement les émissions (Zongxin & SIDDIQI, 1995). Mais ce sont les énergies renouvelables qui commencent à être davantage intégrées dans les analyses de transition des systèmes électriques carbonés vers une production électrique utilisant davantage d'énergies propres (Elhadidy, 2002), car elles apparaissent comme une des solutions les plus déterminantes pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et réduire l'impact du changement climatique.

On note ainsi que des études analysant la disponibilité des ressources renouvelables pour des usages énergétiques sont de plus en plus nombreuses. Ces modèles énergétiques sont plutôt techniques et

ne visent pas l'exploration des systèmes énergétiques mais à faire des prédictions de la disponibilité de ressources. Les modèles s'utilisent pour déterminer la disponibilité de ressources solaires dans certaines zones géographiques spécifiques (Habbane et al., 1986; Meyer & Van Dyk, 2000; Şen & Tan, 2001) ou encore mesurent la disponibilité des ressources éoliennes et les possibilités d'exploitations économiques (Haack, 1982; Panda et al., 1990; Ramachandra et al., 1997). La biomasse émerge aussi comme une option pour produire de l'énergie propre (Kimmins, 1998). Nous mentionnons ces modèles pour souligner la montée de l'intérêt pour les énergies renouvelables et leur étude à différents niveaux. En outre, on observe une augmentation des études des systèmes énergétiques des pays en développement, leur consommation énergétique étant en rapide augmentation (et continuant à l'être), principalement les pays asiatiques tels que la Chine et l'Inde. Les études analysent notamment les différents moyens technologiques et les ressources qui peuvent être mobilisées pour couvrir la demande croissante d'énergie et les conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce sens, ces études portant plutôt sur la manière dont l'exploitation de leurs propres ressources pourrait aider à couvrir leurs besoins énergétiques. Un exemple de modèle utilisé pour ces analyses est « *TEESE* » qui a été utilisé en Inde pour évaluer les interactions énergie-environnement et pour produire un plan d'écologisation du développement indien (Bhattacharyya, 2010).

L'intégration des énergies renouvelables ouvre un vaste ensemble de nouveaux défis que les modélisateurs et décideurs publics doivent prendre en compte pour envisager l'évolution des systèmes énergétiques. La nature variable et intermittente des ressources renouvelables dépendant des conditions météorologiques complexifie très fortement les analyses tout comme leur pénétration dans les systèmes énergétiques. Une haute intégration des énergies renouvelables dans les mix énergétiques, principalement les énergies solaires et éoliennes dans les systèmes électriques, impose des mesures complémentaires pour palier leur nature intermittente liée à l'absence de soleil ou du vent, ou un excès de production électrique dans les périodes de la journée de faible consommation électrique. Pour analyser ces enjeux, différentes solutions sont proposées comme utiliser l'électricité excédentaire pour produire de l'hydrogène (Contreras et al., 1999) ou l'utilisation des batteries pour stocker cette électricité excédentaire (Shaahid & Elhadidy, 2003). Des travaux plus ambitieux commencent à s'intéresser aux systèmes énergétiques à zéro émission de CO₂ avec une intégration massive d'énergies renouvelables, par exemple (Berry & Lamont, 2001) envisagent un secteur de transport complètement décarboné en 2050 avec l'aide de l'électricité et de l'hydrogène. Différents modèles sont utilisés à cet effet, nous trouvons par exemple « *WASP-IV, F-CAST, OREM, MODEST, MARKAL* ».

L'exploration de l'évolution de systèmes énergétiques implique également un grand degré d'incertitude sur diverses variables, par exemple concernant l'impact du changement climatique sur les populations mondiales et l'environnement, les réductions d'émissions de GES nécessaire pour maintenir les impacts du changement climatique à un niveau acceptable, les retours sur investissements, les niveaux de demande, pour ne citer que ceux-là. Les modèles énergétiques commencent à considérer ce contexte et peuvent intégrer une approche stochastique dans les modèles énergétiques (Amit Kanudia & Loulou, 1998; Amit Kanudia & Shukla, 1998). Pour l'étude de ces problématiques, parmi les principaux modèles utilisés sont « *MARKAL, DICE, MERGE, MESSAGE III and CETA-R* ». Par exemple, (Messner et al., 1996) intègrent dans le modèle *MESSAGE III* l'analyse des incertitudes sur l'évolution des caractéristiques des technologies énergétiques futures et internalisent dans leur modèle les interactions entre structures décisionnelles et incertitudes impliquées.

De cette façon, les modèles énergétiques se sont progressivement adaptés pour traiter des contraintes environnementales et ont adopté différentes approches pour les intégrer (Markandya, 1990). Par exemple, certains modèles incluent les coûts de la protection de l'environnement dans les coûts d'approvisionnement énergétique et minimisent les coûts totaux, on peut citer « *WASP, SPSEK, ENERPLAN et LEAP* ». D'autres modèles suivent la même approche que citée précédemment mais réalisent la minimisation suivant des contraintes environnementales (principalement des limites aux émissions issues de technologies de production d'énergie). Ce genre de modèles selon (Markandya, 1990) sont considérés comme des modèles intégrés environnement-énergie, comme par exemple « *ARGUS, EFOM, MARKAL, MESSAGE, WAGP, EGEAS, IDEA et MESAP* ». D'autres encore minimisent les coûts totaux mais calculent les impacts environnementaux (dommages) dans un module séparé. Ce genre de modèles sont considérés comme des modèles annexes environnement-énergie et incluent « *WASP, SPSEK* ». *EFOM* a intégré un module environnemental, devenant *EFOM-ENV*, afin d'étudier, par exemple, des normes, des plafonds d'émissions ou encore les coûts des dommages environnementaux (Nakata, 2004). *WASP-IV* (version 4) a également évolué et est désormais utilisé pour étudier le développement des énergies renouvelables, la taxation du CO₂ et son impact sur le secteur électrique. On peut également citer également *PRIMES*, un modèle d'équilibre partiel axé sur le prix, qui étudie les interactions entre le secteur de l'énergie et l'environnement, ainsi que les politiques énergétiques associées, *POLES*, un modèle qui analyse des scénarios d'offre-demande dans (Capros et al., 1999), ou encore *META-Net*, qui ont tous trois des utilisations similaires à celles des modèles de systèmes énergétiques intégrés. Pour étudier l'intégration des énergies renouvelables, (D. Connolly et al., 2010) font une revue des modèles permettant ce genre d'analyse et donnent une liste de plus de 37 modèles. Parmi ces modèles, 23 permettent le développement des études en appliquant des scénarios. Parmi ces modèles, les plus célèbres en termes d'utilisateurs (plus de 1 000) sont « *RETSscreen, LEAP, energyPRO* » et ceux entre 100 et 1 000 utilisateurs sont « *MARKAL/TIMES, ENERGYPLAN, MESSAGE, ORCED* ». La principale différence d'usage réside dans le fait que les premiers modèles sont en libre accès tandis que les deuxièmes sont à accès payant.

Dans le Tableau 2, nous proposons une catégorisation des enjeux qui ont émergé avec les divers événements en faveur de l'environnement. Nous citons également certains exemples de modèles qui ont servi à réaliser les analyses, aussi qu'un exemple de recherches associées.

Tableau 2 : Récapitulatif des nouveaux enjeux abordés par les modèles énergétiques avec les différents évènements en faveur de l'environnement et du climat, avec un exemple d'outils utilisées et de recherches associées pour chaque catégorie

Champ d'application	Description	Outil de modélisation	Exemples
Potentiel de ressources renouvelables	Etudier le potentiel des ressources énergétiques renouvelables dans une zone intra-nationale	<ul style="list-style-type: none"> • EMMAT 	(Habbane et al., 1986) (Meyer & Van Dyk, 2000) (Şen & Tan, 2001) (Haack, 1982)
Énergie pour les pays en développement	Caractériser les modèles pour pouvoir intégrer des caractéristiques spécifiques des systèmes énergétiques des pays en développement.	<ul style="list-style-type: none"> • RESGEN • TEEESE 	(Able-Thomas, 1996) (Bhattacharyya, 2010)
Paramètres stochastiques /incertitudes	Intégrer des variables stochastiques à l'étude des systèmes énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> • MESSAGE III • MARKAL • DICE 	(Messner et al., 1996) (Amit Kanudia & Loulou, 1998)
Réduction des émissions de GES	Évaluer les émissions du secteur de l'énergie et proposer des stratégies pour les réduire	<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL/TIMES • META-Net • ICLIPS 	(Yamaji et al., 1993) (Nakata, 2004) (Leimbach, 2003)
Intégration des énergies renouvelables au système énergétique	Analyser l'allocation optimale ou l'utilisation efficace des énergies renouvelables.	<ul style="list-style-type: none"> • WASP-IV • F-CAST • OREM • MODEST • MARKAL 	(Santisirisomboon et al., 2001) (Rozakis et al., 1997) (Iniyan et al., 2000) (Lew, 2000) (Henning, 1997)

1.3. La modélisation des systèmes énergétiques locaux

Cette section propose un état des lieux des modèles énergétiques et des études associées qui se sont de manière croissante développés ces dernières décennies à l'échelle locale et portant sur les problématiques énergie-climat.

1.3.1. Une déclinaison des modèles énergétiques à l'échelle locale

L'intérêt pour les systèmes énergétiques régionaux et locaux a considérablement augmenté ces dernières années et les premiers modèles à cette échelle peuvent être identifiés dès 1973 avec notamment les travaux de (Mooz, 1973) où la demande d'électricité est prévue pour quinze sous-régions de Californie aux États-Unis et se décompose selon les secteurs résidentiel, commercial, industriel, gouvernemental et divers. Ce modèle a été utilisé pour faciliter le processus de planification du secteur de l'électricité. (Schulz & Stehfest, 1984) développent quant à eux un modèle d'optimisation pour minimiser les coûts de l'approvisionnement énergétique pour couvrir la demande, en analysant le secteur énergétique au niveau régional avec une économie de marché libre. (C. O. Wene & Rydén, 1988) décrivent les premiers modèles énergétiques municipaux développés en Suède, la mise en place de ces derniers ayant été déclenchée par la loi suédoise de 1977 imposant aux autorités municipales d'inclure l'énergie dans leur planification, suivi d'un amendement demandant la substitution du pétrole puis, par l'amendement de 1985 prescrivant l'élaboration d'un plan énergétique complet. (IIASA, 1982) présente également un modèle énergétique à long terme d'analyse des options d'approvisionnement pour couvrir la demande jusqu'en 2020 pour la région de Stockholm. D'autres modèles se penchent sur l'exploitation des technologies de production énergétique qui sont par nature décentralisées, notamment les systèmes de chauffage urbain. C'est le cas, par exemple, de l'étude développée par (Nijkamp & Volwahren, 1990) qui ont conçu un modèle pour analyser l'expansion du chauffage urbain de Storstrøm au Danemark, ou celle de (Henning, 1997) qui propose un modèle pour minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation du système de production de chaleur urbaine d'une région suédoise. Les premiers modèles de territoires intra nationaux commencent à explorer l'évolution des systèmes énergétiques de ces derniers en suivant une approche similaire à celle suivie pour les modèles nationaux ou mondiaux, autrement dit en analysant le mix optimal de production d'électricité et les meilleures options de couverture de la demande d'énergie. La principale différence entre eux réside sur le type d'énergies qui est analysé. Au niveau local est principalement analysé le développement des énergies qui sont disponibles localement et qui dans la plupart de cas sont renouvelables et utilisées dans des centrales de taille plus modeste qu'au niveau national. Est ensuite étudié comment la production locale électrique pourra interagir avec le système de transport d'électricité national. Les niveaux géographiques analysés sont ainsi assez variés, passant des régions, des pays ou aux villes.

Pour compléter ces approches qui se concentrent sur l'offre et la réponse à une demande exogène, d'autres modèles ciblent la prévision de la demande énergétique. Par exemple, (Sharma et al., 2002) développent un modèle économétrique de prévision de la demande énergétique du Kerala en Inde ayant comme horizon temporel 2020. (Arsenault et al., 1995) prévoient quant à eux la demande d'énergie pour la province de Québec au Canada. (Gonzales Chavez et al., 1999) utilisent le modèle ARIMA pour prévoir la production et la consommation d'énergie des Asturies en Espagne pour la période 1997-1998. Cette déclinaison à l'échelle territoriale de l'analyse de la demande permet de

capturer des caractéristiques plus spécifiques de chaque territoire qui seraient autrement négligées ou perdues dans les données agrégées au niveau national.

D'autres modèles énergétiques étudiant des territoires infranationaux se concentrent sur l'analyse des zones rurales. Ces territoires se caractérisent par une forte disponibilité des ressources renouvelables et une demande d'énergie faible et dispersée sur de grandes zones géographiques. Dans certains cas, à la différence des zones urbaines, ces zones ne sont pas bien desservies par des systèmes de transport et distribution d'énergie bien développés (Hiremath et al., 2007). Dans ce contexte, divers modèles étudient les systèmes énergétiques de zones rurales. (Rijal et al., 1990) prévoient ainsi la demande d'énergie pour le secteur résidentiel d'une zone rurale au Népal. (Joshi et al., 1991) construisent un modèle pour analyser le déploiement des énergies locales disponibles, combinées avec les combustibles traditionnels principalement des produits dérivés du pétrole et du bois, afin de décentraliser la production d'énergie pour les ménages de trois villages du Népal. (Zeftawy & El-Ela, 1991) proposent une technique pour calculer la production nécessaire des centrales éoliennes associées à des centrales au diesel pour alimenter une charge spécifique à un coût minimum respectant les contraintes de fonctionnement des systèmes. De plus, certains modèles énergétiques ruraux inscrivent leurs analyses dans un contexte d'énergie et d'agriculture, c'est-à-dire sur l'utilisation de ressources provenant des cultures et des déchets de l'élevage, pour la production d'énergie et pour améliorer la production agricole. (Alam et al., 1990) développent ainsi un tel modèle pour une ville rurale du Bangladesh. Ces modèles intègrent les caractéristiques spécifiques de leur territoire, ce qui permet de mieux capter les potentiels d'énergies disponibles localement et d'évaluer comment ceux-ci pourront permettre de couvrir les besoins en énergies locales. Ils analysent aussi la relation entre énergie et d'autres secteurs d'activité et le flux de commodités entre eux. Cela s'applique principalement pour le secteur de l'agriculture qui produit différents matériaux qui ne sont pas forcément valorisés et qui pourraient produire de l'énergie.

Puis, peu à peu, les problématiques climatiques et environnementales s'invitent également dans ces champs divers d'analyses locales.

1.3.2. L'effet des enjeux climatiques-environnementaux sur l'étude de systèmes énergétiques infranationaux

La conférence de Río de 1992 en particulier introduit de nouveaux enjeux à la modélisation des systèmes énergétiques, globaux, nationaux mais aussi, progressivement infranationaux dans la mesure où les modèles à cette échelle, peuvent se focaliser sur des solutions spécifiques selon la réalité du territoire, en termes de structure économique, de disponibilité des ressources, etc. Les territoires peuvent également répondre à des défis énergétiques spécifiques et mettre en valeur leurs potentiels d'actions. Les décideurs publics et modélisateurs cherchent par exemple à révéler différents potentiels énergétiques, comme celui du développement des énergies renouvelables, ou encore l'application de stratégies d'efficacité énergétique, options nécessaires pour arriver à atteindre les objectifs de décarbonation. Le développement durable promulgué pendant la convention de Río recommande la mise en place de ce nouveau concept à l'échelle locale, notamment à travers le développement d'un « *Agenda 21* », les villes, départements et régions restant compétentes pour une grande partie des activités économiques et de consommation énergétique dont le transport, les bâtiments, l'aménagement du territoire, entre autres. Ainsi, l'étude des systèmes énergétiques locaux émergent comme un domaine capital (Nakata, 2004).

L'étude des émissions de polluants des systèmes énergétiques constitue une partie fondamentale des analyses des systèmes énergétiques locaux, car ce sont principalement les villes qui concentrent les émissions de polluants atmosphériques dues à la présence des véhicules et des activités économiques. Diverses études se focalisent sur l'analyse de différentes stratégies à travers différents scénarios pour limiter les émissions et les atténuer (Arnette & Zobel, 2012; A Kanudia & Loulou, 1999), d'autres veulent comprendre la variation régionale et spatiale des émissions de gaz à effet de serre dues à la production d'énergie (O'Keeffe et al., 2017). La pollution atmosphérique due aux émissions du secteur du transport est étudiée avec beaucoup plus d'attention par les modèles locaux, car les émissions se concentrent dans des aires urbaines qui présentent des besoins de mobilisations importantes. Ainsi les modèles énergétiques s'utilisent aussi pour évaluer les émissions produites par ce secteur en fonction des comportements de mobilisation et comprendre la dispersion de cette pollution (Karppinen et al., 2000).

Les modèles énergétiques et de prospective à l'échelle locale commencent aussi à intégrer une logique de développement durable dans leurs analyses car il est possible de mobiliser des ressources à travers différents secteurs, augmentant ainsi l'efficacité du système et la réduction de la consommation de ressources. De cette façon, les modèles de prospective cherchent à trouver une façon écologiquement rationnelle pour produire et consommer de l'énergie. Certains modélisent la façon d'augmenter l'efficacité énergétique du système à travers l'utilisation de matériaux et de ressources énergétiques qui auraient autrement été rejetées (Akisawa et al., 1999), se plaçant dans une logique d'économie circulaire (Chapitre 3). La mise en œuvre d'un développement durable s'applique particulièrement aux zones rurales des pays en développement, principalement pour étudier l'interaction entre l'utilisation de la biomasse pour usages énergétiques et agricoles (Kanniappan & Ramachandran, 1998; Painuly et al., 1995) et proposer la méthode la plus adéquate pour mobiliser les ressources permettant de couvrir les besoins énergétiques sans affecter la production des produits comestibles et ainsi améliorer la qualité de vie (Alam et al., 1990). Également, l'utilisation d'autres ressources comme le sol est prise en compte et l'option la plus optimale pour déterminer la répartition des terres et des ressources énergétiques limitées est analysée, pour l'agriculture et pour répondre aux divers besoins énergétiques humains, c'est le cas par exemple des études développées par (McLellan et al., 2014; Raja et al., 1997).

Les énergies renouvelables sont très dispersées sur le territoire d'un pays et leurs potentiels dépendent fortement des zones géographiques. C'est pour cette raison que l'étude des énergies renouvelables par des modèles énergétiques des territoires infranationaux s'est également largement développée (Nakata, 2004), notamment sur l'intégration de la production solaire. L'objectif de ces modèles vise, d'abord, à comprendre comment le développement des énergies renouvelables pourrait modifier les systèmes énergétiques locaux puis comment ceux-ci pourrait aider à la réduction des émissions des gaz à effet de serre (Groscurth et al., 1993), et enfin l'analyse des politiques permettant de favoriser leur production (Cormio et al., 2003). Ces études couvrent des zones géographiques variables, par exemple (Freppaz et al., 2004) décrivent un modèle pour l'utilisation de la biomasse pour couvrir la production électrique et thermique dans une zone de montagne en Italie, (Cormio et al., 2003) construisent quant à eux un modèle en utilisant *EFOM* pour la région des Pouilles en Italie. La production du biogaz est aussi de plus en plus répandue dans les modèles énergétiques, par exemple (Börjesson & Ahlgren, 2012) étudient avec *MARKAL* les perspectives du biogaz dans la région de Västra Götaland en Suède afin d'estimer le soutien politique nécessaire pour augmenter la production de biogaz jusqu'à couvrir les besoins des véhicules ou la production combinée de chaleur et d'électricité.

La croissance des technologies renouvelables dans les mix de production permet d'introduire la notion de systèmes énergétiques décentralisés où les territoires cherchent de plus en plus à développer leurs potentiels pour contribuer à la lutte contre le changement climatique. Les modèles énergétiques sont ainsi développés pour explorer les conséquences de l'implantation de nombreux systèmes énergétiques décentralisés, pour comprendre les interactions entre eux et les effets sur les réseaux nationaux, ainsi que pour déterminer la contribution de ces technologies à la réduction des émissions. On trouve ainsi par exemple les travaux de (Liang et al., 2007) qui développent un modèle long-terme pour mesurer les besoins énergétiques, les possibles évolutions du système énergétique et les émissions de CO₂ associées. La zone d'étude est la Chine, répartie en huit régions économiques tandis que la période étudiée court jusqu'en 2020. (De Miglio et al., 2012) conçoivent un autre modèle long terme en utilisant l'outil TIMES, cette fois sur une période allant jusqu'à 2050 et décrivant l'ensemble du système énergétique italien à travers la représentation de vingt régions interconnectées électriques. Ce modèle permet l'intégration de contraintes au niveau local et régional, en gardant une vision complète des potentiels que chaque région peut développer et des contributions possibles au système.

En outre, avec le développement continu des technologies associées aux énergies renouvelables, les territoires se positionnent comme des acteurs clés dans la mise en place de systèmes énergétiques décarbonés, de sorte que les outils de modélisation sont utilisés davantage dans les travaux de planification pour le développement des systèmes énergétiques régionaux. Par exemple, (Mirakyan et al., 2009) présentent un cadre méthodologique qui combine des approches narratives et de modélisation (*LEAP*). Une telle approche doit permettre de développer un plan énergétique intégré pour le système énergétique de la région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) en France. La modélisation dans ce cas vise à analyser les effets de différentes options proposées par les acteurs locaux pour relever les défis énergétiques présents dans la région étudiée. (Di Leo et al., 2015) développent alors un modèle *TIMES* pour guider la prise de décisions stratégiques en matière de planification énergétique et climatique à moyen et long terme, en évaluant le rôle possible des systèmes énergétiques locaux dans la réalisation des objectifs durables. (Thellufsen & Lund, 2016) étudient avec le modèle « *EnergyPLAN* » dans quelle mesure les plans locaux s'intègrent au système énergétique national. Ils analysent la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et les interactions avec le reste du système électrique (notamment sur la façon dont la production excédentaire est répartie) et plus particulièrement avec le réseau de transport.

Avec la promotion croissante des énergies locales, plusieurs territoires infranationaux dotés en potentiels renouvelables commencent à réfléchir sur une possible indépendance énergétique, car l'établissement d'une production locale et d'un réseau local peut s'avérer moins coûteux, plus facile et plus rapide que d'étendre le réseau à des zones éloignées de faible charge (Bazmi & Zahedi, 2011). Ces résultats dépendent évidemment du territoire, des ressources disponibles et du temps dans lequel il serait envisagé d'atteindre telle décentralisation du système énergétique. (Schmidt et al., 2012) en utilisant le modèle « *BeWhere* » analysent l'autarcie énergétique pour une région rurale en Autriche et ils montrent que les ressources énergétiques locales peuvent être développées pour couvrir la demande énergétique et que la poursuite de l'autarcie énergétique implique des coûts énergétiques élevés pour les consommateurs et une baisse de la production locale de denrées alimentaires et de ressources pour l'élevage. (Drouineau, 2011) investit quant à elle la question de l'intégration des énergies renouvelables intermittentes sur un territoire insulaire, La Réunion, sous l'angle de la dynamique et la fiabilité du réseau électrique qu'elle implémente dans un modèle *TIMES* développé à

cette échelle locale. L'intégration de diverses technologies renouvelables au mix énergétique au niveau local prend le nom de *production distribuée* et (Borbely & Kreider, 2001) étudient ainsi la production d'énergie électrique à petite échelle sur ou à proximité du site de charge : celui-ci est soit interconnecté avec le réseau de distribution, soit directement connecté aux installations du client, soit aux deux. Dans ce contexte, ils se penchent sur l'intégration de petits générateurs à turbine à combustion (y compris les micro turbines), des moteurs et générateurs alternatifs à combustion interne, des panneaux photovoltaïques et des technologies solaires thermiques, des piles à combustible, et sur la conversion de la biomasse. La notion de génération distribuée intègre aussi la gestion de la demande, la promotion de l'efficacité énergétique et le stockage local d'énergie (Chicco & Mancarella, 2009). Dans ce sens, (Caramanis & Haurie, 2017) font par exemple une simulation avec le modèle « *ETEM-SG* » du développement à long terme d'un système régional multi-énergies dans un environnement de ville intelligente pour la région du Léman en Suisse. (Bouckaert, 2013) contribue à cette réflexion méthodologique en modélisant les Smart grids et la *demand-response* dans un modèle TIMES insulaire afin d'y accroître l'intégration des énergies renouvelables variables et répondre ainsi aux engagements de transition énergétique du territoire représenté.

Selon (Mancarella, 2014), les modèles énergétiques traditionnels ont découplé la perspective de planification de la gestion opérationnelle, ce qui ne permet pas d'étudier les interactions entre les différentes parties du système. Dans cette perspective, les systèmes intégrés ou les systèmes multi-énergies (SME) doivent être davantage impliqués pour permettre une transition vers des systèmes propres et bon marché⁶. Le caractère unique de ces systèmes réside dans le choix des approches de ne pas se concentrer sur un seul secteur, mais bien d'élargir la recherche à l'ensemble du système et à différents niveaux géographiques. De cette manière, il est possible d'étudier un changement spécifique dans un secteur, tout en considérant les effets dans les autres secteurs. Les niveaux de désagrégation spatiale de ces systèmes vont des bâtiments aux pays entiers. (Fabrizio et al., 2010) développent ainsi un SME sur des bâtiments pour analyser la combinaison de différentes sources d'énergie, à la fois renouvelables et non renouvelables, afin de couvrir les demandes thermiques et électriques avec une efficacité maximale. (Daianova et al., 2012) proposent une approche pour l'analyse de la production d'éthanol, de biogaz, de chaleur et d'électricité à partir de ressources disponibles localement dans une région au nord de la Suède.

Ainsi, nous avons dressé dans cette partie un aperçu des premiers modèles énergétiques infranationaux et des enjeux associés qui nous ont permis d'identifier les principales préoccupations de ce type d'études. Nous avons pu constater qu'au cours des années 1970, la modélisation de ces territoires s'était principalement attachée à projeter et prévoir la demande d'énergie, à analyser la production des énergies par nature décentralisées comme les centrales de chauffage urbain, et à décrire les systèmes énergétiques des zones rurales. Avec la prise de conscience environnementale, notamment liée aux préoccupations autour du changement climatique et à l'émergence du concept de développement durable, les modèles infranationaux prennent en compte par la suite de nouveaux enjeux : l'introduction d'une plus grande production renouvelable dépendant des conditions climatiques dans le réseau électrique et dans le système énergétique en général, l'utilisation de

⁶ On parle ici de *systèmes multi-énergies* bien que de nombreux modèles mentionnés précédemment et ne rentrant pas directement dans cette catégorie ont déjà analysé divers énergies au même temps.

ressources renouvelables locales et la décentralisation de la production. Ils analysent aussi comment les territoires peuvent se positionner dans le cadre de la transition d'un système plus large et centralisé, c'est-à-dire comment ceux-ci peuvent contribuer à la transition énergétique du pays et aider à la sécurité d'approvisionnement énergétique du pays. Le Tableau 3 propose une catégorisation et une description des problèmes énergétiques étudiés au niveau local et des outils de modélisation développés pour traiter ces enjeux.

Tableau 3 : Catégorisation des nouveaux enjeux abordés par les modèles énergétiques locaux, avec un exemple d'outils utilisés et de recherches associées pour chaque catégorie

Champ d'application	Description	Outil de modélisation	Exemples
Planification énergétique décentralisée	<ul style="list-style-type: none"> • Valorisation des énergies locales disponibles pour faire face à la demande locale • Décentralisation du système énergétique • Systèmes énergétiques d'un ou de multiples territoires infranationaux • Systèmes énergétiques communautaires-municipaux • Processus de planification énergétique à partir d'un aperçu des objectifs et des solutions proposés par les planificateurs énergétiques et par les objectifs nationaux 	<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL • MESSAGE • EFOM • LEAP • TIMES 	<p>(Schulz & Stehfest, 1984)(C. O. Wene & Rydén, 1988)</p> <p>(IIASA, 1982)</p> <p>(Joshi et al., 1991)</p> <p>(Cormio et al., 2003)</p> <p>(A Kanudia & Loulou, 1999)</p> <p>(Mirakyan et al., 2009)</p> <p>(Di Leo et al., 2015)</p>
Modélisation infranationale	<ul style="list-style-type: none"> • Interaction des systèmes énergétiques décentralisés à l'échelle des pays • Utilisé comme outil de soutien au niveau national et régional 	<ul style="list-style-type: none"> • TIMES • Markal 	<p>(De Miglio et al., 2012)</p> <p>(Assoumou, 2006)</p> <p>(Drouineau, 2012)</p> <p>(Bouckaert, 2014)</p>
Demande	Analyse de la demande locale et prévision de la demande future	<ul style="list-style-type: none"> • IFSDM 	<p>(Mooz, 1973)</p> <p>(Arsenault et al., 1995)</p>
Relation entre système énergétique local et national	Évaluation de différentes trajectoires de développement des énergies locales et contributions aux objectifs nationaux	<ul style="list-style-type: none"> • LEAP • EnergyPLAN 	<p>(Bala, 1997)</p> <p>(Thellufsen & Lund, 2016)</p>
Systèmes énergétiques durables	Prendre en compte la concurrence des ressources pour la production d'énergie et des matériaux associés, conduisant à un modèle durable	<ul style="list-style-type: none"> • Huq • GLUE • Parikh model • BeWhere 	<p>(Alam et al., 1990)(Painuly et al., 1995)</p> <p>(Yamamoto et al., 2000)</p> <p>(Kanniappan & Ramachandran, 1998)</p> <p>(Schmidt et al., 2012)</p>

1.4. Les enjeux de modélisation de prospective actuels

Depuis 1990, le domaine de l'énergie est confronté à plusieurs défis d'importance croissante. D'une part, les systèmes énergétiques doivent trouver une production plus respectueuse de l'environnement, en plus de couvrir une demande énergétique qui croît chaque année (à titre d'illustration, en 1990, la consommation d'énergie finale dans le monde était de 6 267 Mtep contre 9 937 Mtep en 2018 (IEA, 2020a)), d'améliorer la sécurité d'approvisionnement pour réduire la vulnérabilité des systèmes et de limiter l'impact des divers événements géopolitiques et naturels qui sont de plus en plus fréquents et qui conduisent généralement les prix des sources d'énergie à augmenter. Avec l'augmentation de la consommation énergétique, les émissions de CO₂ ont aussi crû significativement. Si cette tendance continue, cela pourrait conduire à une augmentation de la température de la planète comprise entre 3 et 5°C vers la fin du vingt et unième siècle, avec des conséquences catastrophiques pour l'environnement, les êtres humains et l'économie. Le GIEC, dans ses diverses publications, recommande d'initier la réduction des émissions de gaz à effet de serre le plus rapidement possible. Cette situation amène la communauté internationale, au cours de la COP 15 à Copenhague, à établir comme objectif de limiter la hausse de la température mondiale à moins de 2 °C en 2100, et au vu de l'ampleur de la situation, l'objectif plus contraignant de limiter la hausse de la température à 1,5 °C est ensuite décidé pendant la COP 21 à Paris. Pour atteindre ces objectifs, une transition énergétique semble de plus en plus nécessaire, comme exprimé dans l'Accord de Paris qui résulte de cette Conférence des Parties.

La notion de *transition énergétique* a émergé dans les années 1980 et a fait l'objet de plusieurs études pour en déterminer définition, caractéristiques et objectifs (Millot, 2020). Malgré l'énorme attention portée à l'étude de la transition énergétique, il n'y a pas encore de consensus sur sa définition. Plusieurs transitions énergétiques ont eu lieu au cours de l'histoire de l'humanité, comme le passage du bois au charbon pendant la première révolution industrielle ou encore la transition vers les produits pétroliers et l'électricité durant la deuxième révolution industrielle. Ces transitions ont été rendues possibles par le développement de nouvelles technologies rendant l'usage des énergies plus rentable et favorisant le développement des différents secteurs d'activités économiques (industrie, transport, etc.). Si on regarde les transitions énergétiques passées, elles consistent à passer d'une source d'énergie primaire vers une autre source d'énergie (Millot, 2020). Après la crise pétrolière, la transition énergétique consistait principalement à remplacer l'utilisation du pétrole par d'autres types d'énergies. On peut par exemple citer le cas du Brésil qui a augmenté l'utilisation des biofuels pour le secteur du transport, la France qui a remplacé par l'énergie nucléaire le pétrole et le charbon dans son mix électrique, ou le Danemark qui a introduit l'énergie éolienne dans le sien (K. M. Araújo, 2013). La transition énergétique actuelle est avant tout poussée par la prise de conscience des enjeux environnementaux et elle est en ce sens beaucoup plus complexe car il ne s'agit pas seulement de promouvoir de nouvelles technologies ou ressources, mais bien de mettre sur place un ensemble de nouvelles façons de gouverner conjointement à la promotion de technologies, au changement de comportements de consommation, qui seront mises en place à travers des actions politiques et sociales (Hecher et al., 2016).

La transition énergétique a progressivement intégré la portée des études énergétiques, suivant initialement une logique de substitution de la consommation des énergies épuisables par des énergies non épuisables (Powell & Oren, 1984) et par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Arent et al., 2017). Cette transition se caractérise par des spécificités régionales ou locales. En Afrique, la

transition énergétique passe par l'augmentation de l'électrification (dont l'origine n'est pas toujours spécifiée), dans le secteur résidentiel par la réduction de la consommation de la biomasse pour la cuisson d'aliments (Gebreegziabher et al., 2012; Lambe et al., 2015). La question de l'électrification accrue se pose aussi en Asie, par exemple au Pakistan qui présente une feuille de route pour satisfaire sa demande finale d'énergie par de l'électricité produite à partir uniquement de sources renouvelables en 2050 (Sadiqa et al., 2018), ou en Chine où la transition énergétique bas-carbone du système électrique est évalué, avec une intégration massive des énergies renouvelables (S. Chen et al., 2020). Aux Etats Unis, en Californie, la transition énergétique s'analyse également autour de la question de l'augmentation de la production des énergies renouvelables (Ruppert-Winkel et al., 2016). En Europe, on retrouve par exemple la question de la sortie du nucléaire et du remplacement de cette énergie par des sources renouvelables (Gaigalis et al., 2013; Guidolin & Guseo, 2016), alors que d'autres montrent que le nucléaire joue un rôle important dans l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre (Bersano et al., 2020). On observe ainsi largement dans les études que les énergies renouvelables sont retenues comme un levier pour atteindre les objectifs de transition, même si une augmentation de la production des énergies renouvelables requiert la mise en place d'options pour faire face à l'intermittence. En ce sens, les réseaux gazier et électrique jouent un rôle prépondérant dans le cadre de la transition énergétique (Doudard, 2019) et les *smart grids* seront déterminants pour aider à maîtriser la demande d'énergie finale (Bouckaert, 2014).

D'autres aspects sous-jacents à la transition énergétique sont aussi analysés à l'aide des modèles notamment l'impact de la croissance économique sur son déploiement. Ainsi, des niveaux élevés de croissance des revenus, d'une part, rendent les ressources économiques disponibles pour l'investissement dans des sources d'énergie alternatives, mais d'autre part, peuvent entraîner une exploitation trop rapide de l'énergie épuisable (Alessandro et al., 2010). De plus, l'incertitude autour des objectifs concernant les émissions de CO₂ (prix, limites des émissions) affectent les investissements dans les nouvelles technologies de production d'énergie ainsi que leurs prix, et par conséquent, le déploiement de celles-ci au sein d'une transition énergétique (Durand-Iasserve et al., 2010). D'autres aspects sociaux, comme l'intégration des comportements ou l'acceptation des énergies, commencent à capter l'intérêt des modélisateurs (Bolwig et al., 2018; Li et al., 2016).

Bien que plusieurs de ces modèles aient comme objectif de réduire des émissions et de contribuer à la lutte contre le changement climatique, d'autres études sont motivés par d'autres raisons, comme entre autres garantir la sécurité d'approvisionnement de l'énergie, réduire la dépendance aux fluctuations des prix ou améliorer l'accès à l'énergie (K. Araújo, 2014). Une autre perspective étudiée par les modèles énergétiques est la *transition énergétique bas-carbone*, laquelle n'a pas non plus de définition claire, mais qui consiste au moins à réduire les émissions de gaz à effet de serre du système énergétique (Milot, 2020). Cela ouvre les débats sur la place du nucléaire dans les mix énergétiques, au vu des très faibles émissions de GES de ces technologies. C'est le cas, par exemple, en Allemagne et en France.

Un autre type de transition étudié à l'aide de modèles énergétiques est le passage à des *systèmes énergétiques durables* (B. Chen et al., 2019). Ces modèles, au-delà de chercher une réduction des émissions de gaz à effet de serre, cherchent à intégrer une analyse intersectorielle, c'est-à-dire coupler l'utilisation de ressources produites dans différents secteurs. Les principales ressources prises en compte sont l'utilisation d'eau (Thiam et al., 2012), des déchets (Sgouridis et al., 2013), du sol (Moffatt & Hanley, 2001) et des émissions, notamment à travers le captage du CO₂ (Gençer et al., 2020).

Certains de ces modèles incluent aussi l'analyse de la consommation d'autres types d'énergies comme les combustibles solides de récupération, mais les objectifs qui ressortent le plus restent en général celui de réduire les émissions et celui de développer les énergies renouvelables, ainsi que ses relations avec le reste des objectifs relatifs à la durabilité qui demeurent relativement faible. Malgré un certain consensus autour la définition du développement durable, aucun accord sur l'amplitude de son application qui semble trop vaste ne ressort. De manière générale, l'étude du développement durable devrait prendre en compte des aspects économiques, sociaux et environnementaux, ce qui n'est pas toujours bien identifié dans les modèles étudiant des systèmes énergétiques.

Dans le cadre du développement durable, d'autres perspectives s'appliquent pour réduire l'empreinte environnementale des systèmes énergétiques, comme par exemple l'économie circulaire. Ce concept d'économie circulaire émerge comme une option pour faire face à la surconsommation des ressources et leur épuisement (Chapitre 3) et les principale ressources étudiées dans cette perspective sont les déchets municipaux car leur utilisation aide à leur gestion et à la couverture de la demande énergétique croissante (Kaza et al., 2018). Par exemple (Tomić & Schneider, 2017) étudie une mobilisation des déchets dans l'Union européenne à l'horizon 2030. Une autre option d'utilisation des ressources dans une perspective d'économie circulaire réside dans la réutilisation des batteries en fin de vie des véhicules électriques pour pouvoir stocker de l'électricité. Par exemple, (Fallah et al., 2021) modélise la disponibilité de batteries à l'horizon 2050 pour l'Irlande. L'économie circulaire commence aussi à être prise en compte comme une stratégie pour une transition énergétique propre. Par exemple, (C. Su & Urban, 2021) étudient une application d'une perspective d'économie circulaire pour la Ville de Meili en Chine. Ils envisagent ici la mobilisation d'énergies fatales, une électrification majeure du secteur du transport et l'utilisation des batteries pour le stockage d'électricité.

Finalement, dans le Tableau 4 nous présentons une liste de modèles qui ont été utilisé depuis 2012 pour étudier le système énergétique. Nous nous sommes pour cela appuyés sur les travaux de :

- (Ringkjøb et al., 2018) qui présentent les outils de modélisation depuis 2012 pour les systèmes d'énergie et d'électricité avec de grandes parts d'énergies renouvelables variables ;
- (Müller et al., 2018) qui détaillent les modèles utilisées pour l'analyse des systèmes énergétiques en Europe ;
- (Abbasabadi & Ashayeri, 2019) qui ont mené une revue des méthodes, outils et techniques de modélisation utilisés pour évaluer les systèmes énergétiques urbains ;
- (Hafner et al., 2020) qui décrivent les modèles macroéconomiques écologiques adaptés à l'étude des transitions énergétiques bas-carbone ;
- (Fattahi et al., 2020) qui étudient différents outils et identifient si ces outils analysent de manière adéquate la transition vers un système énergétique à faible émission de carbone.

Ces différentes études présentent plus de cent outils analysant les diverses caractéristiques et enjeux des systèmes énergétiques dont les principaux modèles sont seulement mentionnés ci-dessous. Ainsi, nous pouvons regarder que certains de ces outils sont toujours utilisés, comme c'est le cas de « *LEAP*, *TIMES*, *EnergyPLAN*, *HOMER* ou *MESSAGE* », et que de nouveaux outils ont été développés. De plus, plus récemment depuis 2014, les outils de modélisation énergétique en libre accès sont particulièrement mobilisés. Ces modèles utilisent de logiciels et données en accès libre pour la modélisation des systèmes énergétiques pour la recherche et la définition des politiques (Oberle & Elstrand, 2019).

Tableau 4 : Exemples d'outils de modélisation utilisés pour analyser systèmes énergétiques

Niveau de désagrégation	Modèle	Objectif	Méthodologie	Couverture géographique
Modèles énergétiques intégrés	ETSAP-TIAM	Évalue des scénarios énergétiques globaux (Choix d'investissement, analyse de scénario, changement climatique, planification énergétique)	Optimisation linéaire, Équilibre partiel, Modèle d'évaluation intégré	Global (15 régions)
	LEAP	Analyse de la politique énergétique et évaluation de l'atténuation du changement climatique (Scenario)	Simulation et optimisation	National
	MESSAGE	Fournit un cadre flexible pour l'évaluation complète des principaux défis énergétiques et l'identification de stratégies de réponses socio-économiques et technologiques aux divers défis (Scenario / Choix d'investissement/ Analyse de politiques)	Optimisation linéaire	Global (11 Régions) et différents modèles nationale
	OSeMOSYS	Étude des systèmes énergétiques intégrés (Choix d'investissement)	Optimisation linéaire	Communauté - Continental
	POLES	Évalue la contribution aux besoins énergétiques futurs des différents types d'énergie et vecteurs d'énergie et détermine les émissions de GES (Scenario, Choix d'investissement)	Equilibre partiel/Simulation	66 régions dans le monde (Global)
	PRIMES	Évaluations d'impact et analyse des options politiques (Scenario + Choix d'investissement)	Equilibre partiel	National (Europe)
	TIMES	Évaluation des scénarios des systèmes énergétiques intégrés (Évaluation Scenario / changement climatique)	Optimisation linéaire / Equilibre partiel	Local – Global
	EnergyPlan	Analyse l'impact énergétique, environnemental et économique de diverses stratégies énergétiques (Scenario / Choix d'investissement)	Simulation	Local - Nations
	HOMER	Modélisation du système énergétique (Choix d'investissement)	Simulation & Optimisation	Local
Secteur Spécifique	PLEXOS	Modélisation des systèmes électriques, de gaz et d'eau (Choix d'investissement/Scenario/analyse de systèmes électriques)	Optimisation - Equilibre partiel	Un seul projet/Technologie, îles/Communauté, Local, Régional, National, Continental, Global
	Gasopt	Étude du système gazier (Choix d'investissement)	Optimisation linéaire	Local – Global
	Astra	Évalue le secteur du transport (Scenario + Choix d'investissement)	Simulation	National (Europe)
	SciGrid	Simulation du réseau de transport d'électricité européen (Choix d'investissement)	Simulation	Résolution nodale

	RESTORE	Évalue les coûts et les avantages du stockage d'énergie avec une haute teneur en énergies renouvelables (Scenario, Choix d'investissement)	Simulation & Optimisation	Projets/Technologies
	Enerallt	Étude du réseau de transport de gaz au niveau européen (Choix d'investissement)	Simulation	Local - Global
Macro	E3ME	Répond aux questions de politique macroéconomique et évalue les impacts des politiques Énergie-Environnement-Économie (E3)	Econométrie	Global
	PANTA RHEI/GINFORS	Modélise le changement structurel à long terme du développement économique et des interdépendances entre environnement-économie (Scenario / Analyse de politiques)	Simulation	Pays
	MEDEAS	Simule une transition de système énergétique durable sous contraintes environnementales et socio-économiques (Scénario / Analyse de politiques)	Dynamiques des systèmes	Global - Pays
	EURACE	Aborde divers domaines économiques, y compris des questions sur la libéralisation du marché du travail, les effets de l'assouplissement quantitatif ou les effets d'une politique de tarifs de rachat (Scenario / Analyse de politiques)	Simulation	Global - Pays
	ENGAGE/DSK	Explorer l'effet des acteurs nationaux sur les politiques climatiques (Scenario / Analyse de politiques)	Simulation	Global - Pays

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'évolution de modèles énergétiques en tant qu'outils qui ont servi à l'exploration de l'évolution des systèmes énergétiques pour mieux comprendre les effets de politiques ou de choix, et ainsi être en mesure de prendre des décisions plus précises. Tout d'abord, les études des systèmes énergétiques utilisant des modèles énergétiques étaient axées notamment sur le système d'offre pour satisfaire une demande de plus en plus croissante, avec un intérêt particulier sur le secteur de la production d'électricité, pour améliorer sa performance, évaluer les possibles expansions et calculer les rendements de nouvelles technologies de production à des échelles nationales. Ces premiers modèles n'utilisaient pas vraiment une démarche de prospective, ils suivaient une logique plutôt opérationnelle et étaient utilisés principalement par des organismes gouvernementaux et scientifiques.

Les chocs pétroliers bouleversèrent complètement le domaine de l'énergie et firent émerger des nouvelles problématiques devant être étudiées par les modèles énergétiques, singulièrement, comprendre comment l'épuisement des ressources énergétiques peut affecter l'évolution de systèmes énergétiques et l'impact des prix sur le choix d'énergie, ainsi que la relation entre énergie et économie. En outre, les notions de substitution et réduction émergent avec force et des options de substitution du pétrole sont cherchées. Ainsi, pour l'analyse de ces enjeux, la démarche prospective s'applique particulièrement aux modèles énergétiques avec la construction de scénarios envisageant un éventail de trajectoire d'évolution des systèmes énergétiques à long terme.

Les événements en faveur de l'environnement vers la fin du XX siècle ont introduit de nouvelles préoccupations sur l'évolution des systèmes énergétiques, principalement réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter les impacts sur le climat et sur la planète. Les modèles énergétiques commencent alors à être employés ou conçus afin d'analyser principalement les manières de réduire la pollution et les émissions de gaz à effet de serre, et les technologies candidates pour aider dans cet objectif. Dans ce cadre, les énergies renouvelables sont davantage prises en considération, ce qui conduit à d'autres questions telles que de déterminer quel est l'effet d'une telle intégration sur le système énergétique, et comment faire face à leur nature intermittente. De plus, les modélisateurs s'intéressent au concept de développement durable et analysent l'évolution des systèmes énergétiques et leur relation avec d'autres ressources comme l'eau ou le sol.

Ainsi, les modèles énergétiques passent progressivement à l'étude du passage de l'utilisation des énergies polluantes vers des énergies respectueuses de l'environnement, et de ce fait de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, intervenant dans la problématique de la *transition énergétique*. Ainsi, cette notion de *transition énergétique* survient de plus en plus tant dans les débats de société que dans les analyses issues des modèles énergétiques qui cherchent principalement à réduire la consommation des énergies fossiles et les émissions de dioxyde de carbone. D'autres études se focalisent sur la manière de parvenir à une *transition énergétique bas-carbone* ou à un *système énergétique durable* qui se concentrent principalement sur la mobilisation de ressources à travers différents secteurs. Dans cette perspective de développement durable, nous avons pu relever un certain nombre de modélisateurs qui cherchent à appliquer une démarche d'économie circulaire. Quoiqu'il en soit, la recherche d'un changement vers un système énergétique respectueux de l'environnement est ancrée dans les études de modélisation prospective des systèmes énergétiques.

Enfin, la prise en conscience des enjeux environnementaux amène aussi les chercheurs et décideurs politiques à s'intéresser davantage aux systèmes énergétiques infranationaux, car à ce niveau c des stratégies intersectorielles pouvant contribuer à une majeure mobilisation de ressources peuvent être particulièrement analysées. Ces études cherchent à mieux intégrer les caractéristiques des territoires et à mieux développer les énergies disponibles localement afin de contribuer à la transition énergétique du pays. D'autres études de territoires infranationaux s'intéressent plutôt à une décentralisation du système énergétique, voire vise une autonomie. Dans cette optique, pour rendre possible le développement des systèmes énergétiques territoriaux, il s'avère nécessaire, de la part des gouvernements, de mettre en œuvre une gouvernance plus partagée et inclusive permettant aux territoires de s'approprier les enjeux énergétiques et de leur donner les compétences nécessaires pour qu'ils puissent développer leurs ressources et contribuer à la transition énergétique du pays. Dans cette perspective, dans le chapitre suivant, nous présenterons comment la France a décliné sa politique énergétique vers ses territoires pour qu'ils puissent développer leur système énergétique et contribuer à la transition énergétique du pays

Chapitre 2 – La gouvernance du secteur énergétique en France : de la centralisation à la déclinaison de la politique énergétique des territoires

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié différents événements géopolitiques et environnementaux impactant les systèmes énergétiques et leurs évolutions et surtout, le développement des modèles énergétiques et de prospective, ainsi que l'évolution des problématiques analysées pour répondre à ces nouveaux enjeux. Nous avons également mis en avant que ces derniers s'étudiaient d'abord d'un point de vue global et national mais que l'importance croissante des considérations climatiques et le développement des énergies renouvelables (entre autres) conduisaient à étudier l'évolution des systèmes énergétiques à des échelles plus locales. Il en résulte ces dernières années un important développement de modèles de prospective énergétique dédiés à l'analyse de ces questions, du global au territoire, et plus récemment portant clairement cet objectif de transition énergétique et de système durable.

Pour atteindre une telle transition, il est également apparu nécessaire de faire évoluer les modes d'organisation et de gouvernance du système énergétique conjointement à la mise en place de nouvelles politiques et orientations énergétiques visant la promotion des technologies bas carbone, le changement des comportements de consommation, la préservation des ressources, etc. Voire, pour certains pays de faire évoluer les compétences des différentes instances afin de pouvoir répondre aux défis à relever et mettre en œuvre les solutions adéquates. C'est ce que nous avons pu par exemple observer en France, depuis la fin du vingtième siècle, où, progressivement, le pays a été amené à conduire une politique énergie-climat de manière plus concertée, passant ainsi d'une tradition de centralisation à une définition plus partagée des politiques et des objectifs. Les collectivités locales françaises apparaissent ainsi comme des acteurs clés de la transition énergétique et sont attendues pour apporter leurs contributions aux objectifs énergie-climat nationaux dont elles en déclinent leurs propres objectifs et orientations stratégiques pour leur territoire.

Ainsi, dans ce chapitre, nous nous concentrerons dans un premier temps sur la France et présenterons l'évolution du rôle des instances politiques locales, en particulier au regard des étapes de centralisation et de décentralisation que le pays a connues. Nous développerons le processus de territorialisation des politiques et objectifs énergie-climat avant de nous focaliser sur le cas de la région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA).

2.1. Histoire de la politique énergétique française et de sa territorialisation

En France, au début du XVIII^e siècle, la consommation énergétique était couverte principalement par la biomasse, les ressources hydriques, l'éolien et la force musculaire des hommes et des animaux. Ces énergies étaient utilisées principalement pour satisfaire les besoins locaux de cuisson, de chauffage et du secteur agricole (Jarrige & Vrignon, 2020). Vers les années 1815, la consommation énergétique de la France commence à augmenter avec l'activité croissante du secteur de l'agriculture, alors le plus important en Europe (Bonchamp, 2020), et cette croissance de la demande énergétique continue avec l'apparition de nouveaux usages, en particulier l'éclairage public qui utilisait du gaz manufacturé

(Beltran et al., 2020). La demande énergétique s'accroît avec la révolution industrielle des années 1830, sur la base principalement du charbon pour les machines à vapeur. Ces machines permettaient aussi de produire de l'électricité, et dès 1870, son déploiement en France suit des initiatives locales et privées (Ibis). Ainsi, vers la fin du XIX^e siècle, le développement du secteur énergétique se fait en grande partie localement. La production d'électricité et de chaleur, la distribution et la fourniture d'énergie, dont le gaz, proviennent de petites unités à l'échelle des quartiers ou des villes. S'agissant du gaz et de l'électricité, les acteurs privés, notamment des industriels, dirigent alors les développements de la production d'énergie, les collectivités locales restant néanmoins en charge de la gestion et de l'encadrement des développements d'infrastructures et disposant également du rôle d'autorités concédantes (Boutaud, 2017). Le charbon était pour sa part sous le contrôle et l'encadrement direct de l'État depuis 1810 où la loi du 21 avril le place comme propriétaire du sous-sol et chargé des concessions. Nous nous concentrerons dans les sections suivantes sur l'organisation énergétique du gaz et de l'électricité.

Ainsi, les communes, à travers leur rôle d'autorités concédantes, sont déterminantes pour l'évolution du système énergétique : ce sont les communes qui, à travers les concessions et le contrôle des prix, peuvent arbitrer entre les vecteurs concurrents, principalement entre le gaz et l'électricité pouvant tous deux être utilisés pour les besoins de chauffage et d'éclairage. Les communes sont à cette époque également chargées du développement des réseaux de distribution d'électricité, de gaz et de chaleur et doivent donc garantir une forme de *service public de l'électricité*, conduisant à une meilleure couverture des zones rurales, territoires généralement en marge des investissements privés à cause de leur faible rentabilité. Ce sont donc les autorités locales qui jouent un rôle clé au moment de la construction du système énergétique français (Degremont, 2018). Le rôle de l'État à cette époque-là, se centrait essentiellement sur la législation et la mise en place des réglementations pour bien encadrer les actions des collectivités locales et pour garantir le libre marché (Beltran et al., 2020).

Après la première guerre mondiale, en 1918, la croissance démographique et l'augmentation de l'activité industrielle stimulent la demande énergétique et plus particulièrement celle de l'électricité. Ainsi, la croissance du secteur énergétique est plus rapide, grâce au progrès technique et technologique permettant le développement de centrales plus puissantes et le déploiement de réseaux électriques plus performants (F.-M. Poupeau, 2008). Au vu du développement important du secteur électrique et de sa nature stratégique, l'État commence à intervenir davantage et met par exemple en place des réglementations et lois pour promouvoir le développement de l'utilisation de la force motrice de l'eau, accélérant le développement des centrales hydrauliques (à cette époque, l'intérêt stratégique de cette ressource s'expliquait notamment par la localisation des centrales, à savoir « loin des ennemis »). Les centrales de production deviennent de plus en plus nombreuses, nécessitant de fait un réseau électrique de plus en plus interconnecté. Ainsi en 1922, l'État, afin de favoriser l'interconnexion électrique nationale, confie au Ministère des Travaux le développement des lignes de transport haute tension. Il impose alors une harmonisation technique du système pour en conserver l'équilibre et établit des directives en matière de fréquences, tensions et courants à utiliser afin de rendre le système plus stable (Berthonnet, 1999).

Le réseau électrique plus interconnecté permet de conduire l'électricité vers des territoires plus éloignés et favorise une production plus centralisée à travers des unités de production plus puissantes qui bénéficient alors d'économies d'échelles et, par conséquent, d'une réduction importante des coûts fixes et une augmentation des profits à mesure qu'elles accèdent à des marchés plus importants

(Degremont, 2018). Cela motive l'intégration de différentes entreprises autour de l'activité de production et de la fourniture d'électricité, et conduit également à l'établissement de tarifs plus élevés de vente de l'électricité car ces dernières possèdent alors un pouvoir de marché et de négociation plus important face aux clients et fournisseurs (Ibid.). Ces éléments conduisent à affaiblir la position des autorités locales : les systèmes énergétiques commencent à sortir de leur emprise, leur contrôle sur les grandes entreprises étant limité (Fernandez, 1999). Face à cela, en 1934, les collectivités territoriales se regroupent en créant une association, la « *Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR)* » grâce à laquelle les élus locaux renforcent leur autorité politique. Ils mettent ainsi en place une taxe sur la consommation électrique basse tension dans les grandes villes dont les fonds sont utilisés pour développer les interconnexions des zones rurales qui restaient sous-développées. A ce niveau, les collectivités territoriales acquièrent une sorte d'autonomie vis-à-vis de l'État pour investir dans les zones rurales. Par contre, à travers la FNCCR, les collectivités locales appellent à une intervention de l'État pour reprendre le contrôle sur les grandes entreprises du secteur énergétique. Elles obtiennent alors la baisse des prix de la distribution électrique de dix pourcents. Une limite maximale des prix est également fixée et une commission pour surveiller le marché est créée (Degremont, 2018). Cela permet de limiter les différences tarifaires liées à la localisation des consommateurs. L'État prend ainsi progressivement le contrôle d'un système dont la taille dépasse déjà les moyens de gouvernance des collectivités locales (Degremont, 2018).

Ainsi, à l'aube de l'émergence des systèmes électrique et gazier, les collectivités territoriales constituaient des acteurs majeurs pour le développement de ces secteurs électrique et gazier à travers leurs encadrements et leur rôle d'autorités concédantes, donnant *une très forte importance aux formes de gouvernance locale*. Mais la croissance et l'évolution des systèmes énergétiques accroissent le pouvoir sur le marché des grandes entreprises, au détriment des collectivités territoriales sur lesquelles elles n'ont que peu de contrôle, créant les conditions pour une intervention plus marquée de l'État dans ce secteur, jusqu'à la centralisation de la gestion du système énergétique. C'est ce que nous allons voir dans la section suivante.

2.1.1. La centralisation de la gestion du secteur énergétique français

Vers la fin de la deuxième guerre mondiale, les réseaux d'énergie font partie du patrimoine endommagé par la guerre, les besoins de reconstruction des infrastructures sont alors énormes et la disponibilité des capitaux rare. De plus, le caractère de monopole naturel du réseau de transport d'électricité et la nature stratégique de l'énergie pour le développement du pays donnent des conditions additionnelles pour que l'État prenne le contrôle du système énergétique. Il en résulte l'adoption en 1946 du projet de nationalisation des systèmes électrique et gazier : le contrôle du secteur de l'énergie est alors attribué à l'État à travers la nationalisation de la production, du transport, de la distribution, de l'importation et de l'exportation de l'électricité et du gaz. EDF (Électricité de France) et GDF (Gaz de France) sont créées en tant qu'entreprises verticalement intégrées. De plus, le rôle d'autorité organisatrice de l'énergie est retiré aux communes (La Fabrique Ecologique, 2013), mais elles gardent néanmoins la propriété de leurs réseaux de distribution et la compétence d'autorité organisatrice du service public de distribution. Cela permet aux collectivités territoriales d'être associées à l'élaboration de réformes en matière de tarification. Elles conservent aussi la maîtrise d'ouvrage pour tout développement des réseaux de distribution en zones rurales, activités qui sont alors déléguées dans la plupart des cas à EDF. Elles perdent toutefois la possibilité de choisir leurs

cessionnaires car c'est désormais EDF qui est chargée de l'exploitation des centrales de production de l'électricité, ainsi que du transport et de la distribution de cette dernière (Dreyfus & Allemand, 2018). A noter que le maintien des pouvoirs des collectivités locales en 1946 se justifie seulement par des arguments politiques car l'État tente alors de gagner le soutien des élus locaux à la création de ces deux monopoles, EDF et GDF (F. Poupeau, 2010). En effet, après la nationalisation, les contrats de concession entre collectivités territoriales et les nouvelles entreprises créées ne sont plus signés et restent en suspens, car EDF et l'État craignaient que les collectivités locales puissent s'en servir pour s'immiscer dans la régulation énergétique (Ibid.). Pour les mêmes raisons, les questions d'urbanisme, sous la responsabilité des collectivités territoriales, ne sont pas intégrées dans l'élaboration des politiques énergétiques, les deux opérateurs publics nationaux préférant contrôler leurs investissements et marchés.

La centralisation du système énergétique se consolide les années suivantes avec les résultats obtenus par le gouvernement en termes de sécurisation et de modernisation du secteur électrique, ainsi qu'avec l'achèvement de l'électrification de l'ensemble du territoire français vers les années 1960. Cette électrification du pays a été possible grâce à la production de grandes centrales hydrauliques (construites principalement dans le Sud de la France) et thermiques (construites dans le Nord) qui ont été développées par EDF. Ces centrales comptent pour 76 % de la production, le reste provenant de petites centrales qui n'ont pas été nationalisées en raison de leur faible capacité (Veyret-Verner, 1961). Dans ce contexte, la nationalisation du secteur électrique a favorisé le développement des grandes unités productrices.

Un autre fait consolide ce mouvement de centralisation, il s'agit du développement de la filière nucléaire, renforcé après le choc pétrolier des années 1973. En effet, la consommation d'énergie primaire étant satisfaite à ce moment-là en France à plus de 60 % par des produits pétroliers, la hausse du prix du pétrole produit un grand chamboulement sur l'économie des Français (Meuric, 1973). Pour éviter de telles conséquences néfastes à l'avenir, le gouvernement décide rapidement de mettre en place des politiques d'indépendance énergétique, de diversifier les sources d'approvisionnement d'énergie primaire, de sécuriser son approvisionnement en énergie et de favoriser une utilisation plus efficace de l'énergie, en particulier pour ce qui a trait au pétrole (Taylor et al., 1998). On notera que la recherche autour du secteur nucléaire était subventionnée depuis la deuxième guerre mondiale avec notamment la création du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) en 1945. L'objectif était de soutenir la recherche autour de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans les domaines des sciences, de l'industrie et de la défense nationale. Cela a permis à la France de faire des avancées importantes sur l'utilisation de l'énergie nucléaire en termes de défense militaire et de production d'électricité. Ainsi, le nucléaire est choisi comme l'énergie à développer face aux enjeux susmentionnés. La diversification d'approvisionnement des énergies primaires conduit la France à augmenter l'importation de gaz naturel et à réduire les importations de pétrole du Moyen-Orient. Une taxe associée à l'achat d'essence et une autre pour la consommation de diesel (la taxe sur l'essence est alors plus importante que celle sur diesel) sont aussi mises en place avec pour objectif de réduire la consommation d'essence et d'augmenter celle du diesel provenant des raffineries françaises (Andriosopoulos & Silvestre, 2017).

En 1981, après plusieurs débats sur les risques pour l'environnement du développement de la production électrique nucléaire (déchets radioactifs), sur les risques d'approvisionnement de l'énergie et sur les opportunités d'un possible développement des énergies locales renouvelables, deux rapports sont présentés (Chasseriaux, 1983). Le premier rapport, nommé rapport Hugon, favorise

principalement les politiques de maîtrise de l'énergie au détriment de la construction de nouvelles centrales de production mais conserve une production centralisée. Le deuxième rapport, ou rapport Bourjol, recommande une intégration des citoyens dans les prises de décisions relatives aux questions énergétiques et préconise que les régions élaborent leurs propres plans énergétiques. L'objectif est alors de permettre aux autorités des différents territoires français de développer les sources locales d'énergie pour contribuer à l'indépendance énergétique du pays et de favoriser les économies d'énergie. La création d'une agence nationale d'information sur l'énergie adossée à des correspondants régionaux est également préconisée. Ces organismes régionaux auraient comme rôle d'informer, d'organiser, de concerter et de coordonner les plans énergétiques entre les niveaux nationaux et locaux (J.-Y. Faberon, 1982). Au final, les choix politiques de la France s'inscrivent dans les recommandations du rapport Hugon et les différents territoires français restent à la marge des décisions sur les questions énergétiques. L'évolution vers une régulation locale et le soutien à une production décentralisée qui diversifierait les sources de production d'électricité notamment vers les énergies renouvelables risquaient en effet de compromettre la création de nouvelles centrales nucléaires (F. Poupeau, 2010).

En résumé, avec la nationalisation du secteur énergétique, la France atteint une électrification importante du territoire grâce au développement, dans un premier temps, de grosses centrales électriques hydrauliques et thermiques, et ensuite avec le développement de la filière nucléaire laissant ainsi de côté les collectivités territoriales et la mobilisation des ressources locales. Bien que la centralisation de la régulation du système énergétique français ait alors contribué à ces résultats, diverses problématiques politiques, économiques et environnementales vont venir remettre en cause cette centralisation et faire réémerger les collectivités territoriales comme des acteurs clés du devenir des systèmes énergétiques. C'est ce que nous allons voir dans la section suivante.

2.1.2. La décentralisation de la gestion du système énergétique

2.1.2.1. Enjeux concurrentiels, économiques et liés au marché

Parallèlement au rôle joué par le centralisme français en matière de régulation du système énergétique dans le développement de la filière nucléaire et du secteur énergétique même, les faibles performances économiques des années 1970, en particulier suite aux chocs pétroliers, conduisent à la remise en question du modèle « centralisateur » français qui prédomine alors depuis plus d'une vingtaine des années (F. Poupeau, 2004). En effet, l'efficacité des actions de l'État est critiquée car elles semblent inadaptées aux changements économiques abrupts de cette période. En 1976, le rapport *Vivre ensemble* d'Olivier Guichard discute le manque d'action et les mauvaises performances de la part de l'État dans plusieurs domaines à caractère local, comme l'habitat ou la santé, et comment cette situation n'a pas permis leur bon développement (Mercier, 2000). En outre, le contre-choc pétrolier des années 1980 voit des prix du pétrole faibles ce qui alimente les débats autour du système nucléaire centralisé : la fission de l'atome est alors plus chère que l'utilisation du pétrole. En outre, son image d'État modernisateur et performant est mise à mal (Dollé, 1978), critique accentuée par les coupures électriques survenant pendant l'hiver particulièrement froid de 1986 (HURIET, 1999) et par la mise en place de surcapacités de production nucléaire suite à une prévision trop haute de la consommation (Bonduelle, 2006).

Ainsi, pour donner plus de moyens d'action aux collectivités locales et accroître l'efficacité de l'action publique, des réformes territoriales sont mises en place. Entre 1982 et 1986, 25 lois complétées par environ 200 décrets se succèdent (Vie Publique, 2020). C'est ce que l'on a appelé l'Acte I de la décentralisation où la répartition des compétences entre les communes, les départements, les régions et l'État est modifiée. Plus précisément, à travers les lois du 7 janvier et 22 Juillet de 1983, l'État cherche à rapprocher l'administration des citoyens, à transférer des compétences vers les régions, départements et communes, en les dotant aussi des ressources financières pour gérer ces nouvelles compétences (Boutaud, 2017).

Cette première vague de décentralisation est complétée par différentes lois proposées dans les années 1990 : la *Loi d'orientation relative à l'administration territoriale de la République* en 1992, la *Loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire* – dite « Loi Pasqua », la *Loi du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire* – dite « Loi Voynet ou LOADDT », la *Loi du 12 juillet 1999 relative au renforcement de la coopération intercommunale* – dite « Loi Chevènement », en 2000, la *Loi relative à la Solidarité et au Renouvellement urbain* – dite Loi SRU, et en 2002 la *Loi relative à la démocratie de proximité*. Ces lois relancent la coopération intercommunale et instituent les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), ainsi que des orientations pour l'aménagement et le développement du territoire. Bien que ces premiers projets de décentralisation ne concernent pas directement l'énergie, ils constituent par la suite des leviers qui permettent aux communautés locales de récupérer petit à petit des compétences concernant le secteur de l'énergie. Par exemple, à travers l'aménagement du territoire, il est possible de promouvoir l'utilisation du transport en commun avec des quartiers mieux desservis ou encore, en créant des voies exclusives pour les véhicules à mobilité individuelle (vélos, trottinettes) d'inciter à l'utilisation des véhicules propres.

L'Acte II de la décentralisation est lancé en 2003. Il comprend une révision constitutionnelle relative à une organisation décentralisée de la République, consacre l'existence juridique des régions et reconnaît aux collectivités territoriales des compétences élargies. Dans le cadre de cette loi, les collectivités territoriales reçoivent une autonomie financière tant au niveau des recettes que des dépenses, c'est-à-dire qu'elles peuvent utiliser librement les ressources qu'elles reçoivent. Concernant les recettes, la loi définit les impôts perçus par les collectivités territoriales, ainsi que les actions qu'elles peuvent mettre en place en matière de fiscalité, plus précisément elles percevront la taxe spéciale sur les contrats d'assurance (TSCA) pour les départements et la taxe intérieure sur les produits pétroliers (TIPP) pour les régions (Vie Publique, 2019b). La loi prévoit aussi la possibilité de partager des impôts entre l'État et les territoires. À travers cet acte, l'État transfère de nouvelles compétences aux territoires, concernant le développement économique, la formation professionnelle, le transport, les actions sociales, l'éducation et la culture (Vie Publique, 2019a). Le droit à l'expérimentation est aussi intégré à travers cet acte, par lequel les collectivités territoriales peuvent adapter une politique publique ne faisant pas partie de leurs attributions légales, pour une période donnée (5 ans) (Vie publique, 2021). Même si les questions énergétiques ne sont pas spécifiquement évoquées, ce processus donne plus d'autonomie et des compétences élargies aux autorités locales dans les domaines de l'urbanisme et du développement du territoire, ce qui a une incidence significative sur les questions énergétiques et le développement durable (F. Poupeau, 2010).

Une autre évènement qui contribue à la remise en cause de la centralisation est la croissance de l'intégration économique et monétaire, et de la concurrence internationale, poussant les

gouvernements européens à changer leurs modes traditionnels de gouvernance (Majone, 1997). En effet, l'Union européenne fondée sur les principes d'un ordre libéral s'entend instaurer cette vision économique à travers l'Europe (notamment pour ses pays membres). À partir de 1980, l'Europe s'engage davantage dans la promotion des principes libéraux, autrement dit promouvoir la libre circulation des biens, des services, des hommes et des capitaux pour arriver à une intégration progressive des économies (Marchal, 1958). Ainsi, l'Acte unique européen qui cherche à supprimer les entraves aux échanges au sein de l'Union est signé en 1986, afin de créer un marché unique. En ce qui concerne l'énergie, l'ouverture de ce marché consiste à passer de plusieurs marchés nationaux qui fonctionnent indépendamment à un seul marché européen intégré pour assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique avec des prix abordables, respectant l'environnement et garantissant une concurrence saine. Pour se faire, différentes directives sont mises en place à partir de 1996 dans l'objectif de faire évoluer le secteur énergétique vers un marché plus intégré, plus libéralisé et plus concurrentiel, en séparant les activités dites concurrentielles (la production) de celles de type monopolistique (transport et distribution).

Dans ce contexte de libéralisation, la France a donc dû changer radicalement la structure de son marché, par le biais de plusieurs lois qui s'enchaînent de 2000 à 2010. Tout d'abord, la *Loi relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité* en 2000, traduction en droit français des directives européennes, marque l'amorce de l'ouverture à la concurrence du marché de l'électricité. Cette loi est ensuite complétée par la *Loi de 2003 relatives aux marchés du gaz et de l'électricité* qui marque la fin du monopole d'EDF et GDF en séparant les activités de fourniture et de transport et distribution. En 2004, l'ouverture des marchés continue avec la *Loi relative au service public de l'électricité et du gaz et aux entreprises électriques et gazières* qui définit le statut des gestionnaires des réseaux de transport et de distribution. La *Loi du 7 décembre 2006 relative au secteur de l'énergie* marque quant à elle l'ouverture complète des marchés de l'énergie en permettant à tous les clients de pouvoir choisir leur fournisseur d'énergie. Elle contraint également EDF à acheter toute production électrique provenant de sources renouvelables et de sources plus performantes (comme la cogénération) ou encore liées à la valorisation énergétique des déchets. Il est alors nécessaire de prendre en compte les nouveaux acteurs et de repenser la façon dont sont réalisés les investissements. En effet, avec le monopole d'État pour la production d'énergie, les investissements étaient importants et visaient jusque-là des retours sur investissement à long terme, comme dans le cas des centrales nucléaires. Avec l'ouverture des marchés et l'implication de nouveaux acteurs, les retours sur investissements sont alors aussi envisagés sur des durées plus courtes et les investissements sont moins importantes, comme dans le cas des énergies renouvelables. Ce qui permet l'entrée des nouveaux acteurs et favorise le développement des énergies locales de taille plus modeste. En 2010, la *Loi NOME (Nouvelle Organisation du Marché de l'Électricité)* promeut la concurrence sur le marché de l'énergie et l'accès régulé à la production nucléaire est donné aux fournisseurs alternatifs (Creti et al., 2011).

Cette libéralisation du marché de l'énergie donne l'opportunité aux collectivités locales de repenser leur façon de s'approvisionner en énergie et motive l'entrée de nouveaux acteurs dans le domaine de l'énergie tant pour la fourniture d'énergie que pour la production permettant ainsi la mobilisation de centrales plus petites alimentées avec des énergies renouvelables disponibles localement. Elle permet aussi l'entrée d'opérateurs concurrents et la transformation des institutions centralisées (EDF et GRDF) qui doivent par la suite offrir des produits et services adaptés aux besoins des acteurs locaux.

2.1.2.2. Les enjeux climatiques, environnementaux

En 1992, l'engagement mondial pour le climat s'insère davantage dans les débats politico-économiques de toute la société. Le Sommet de la Terre de Rio adopte cette année-là différents outils qui servent de base pour intégrer le climat et le développement durable au cœur des politiques publiques et la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) qui est alors créée constitue le socle de la lutte contre le réchauffement climatique à l'échelle internationale. Cette convention ouvre les négociations internationales du climat qui conduisent en 1997 à l'adoption du Protocole de Kyoto, par lequel la France est tenue de stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre en 2012 par rapport à 1990. Cet objectif français résulte du partage de la charge entre les Etats membres de l'Union européenne qui s'est fixée un taux de réduction global de 8 % sur la même période. La répartition tient alors compte des perspectives de croissance économique, de la situation en matière d'énergie et de la structure industrielle de chaque Etat membre.

Dans ce contexte, pour opérationnaliser le développement durable et ses principes⁷, les « Agendas 21 » (en français, connues aussi sous le nom d'Action 21) sont également proposés au cours du Sommet de la Terre. Sous ses 27 principes et ses 40 chapitres, on retrouve dans l'Agenda 21 le développement durable, mais aussi le lien entre le droit au développement et la protection de l'environnement, les besoins particuliers des pays en développement, la nécessaire participation des citoyens, et le rôle des femmes. Ces cinq finalités sont ainsi transversales aux enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Interdépendantes, et doivent être poursuivies de front dans les politiques, en particulier des collectivités territoriales. En effet, l'Agenda 21, accorde une place privilégiée à ces dernières (régions, départements, communes, communautés de communes ou encore d'agglomération) et les invite à définir et mettre en œuvre ces principes à leur niveau, en répondant à leurs besoins locaux, à travers des agendas 21 locaux. Un grand nombre de problèmes et solutions y ayant trait ayant leur origine dans les activités locales, la participation et collaboration des acteurs locaux s'avèrent de ce fait un facteur clé pour la promotion du développement durable. L'énergie fait également une entrée importante dans le programme des agendas 21 : le chapitre 4 de l'agenda 21 est consacré à la nécessaire modification des modes de consommation grâce à une meilleure utilisation de l'énergie et des ressources (United Nations, 2004a), tandis que le chapitre 9 est dédié à la protection de l'atmosphère, en promouvant le développement des énergies qui permettent une réduction de la pollution atmosphérique par l'usage des énergies renouvelables et l'augmentation de l'efficacité énergétique (United Nations, 2004b). Les agendas 21 favorisent la décentralisation et encouragent la mise en place de politiques de développement durable (donc indirectement de l'énergie) à l'échelle territoriale. Entre 1994 et 2004, force est cependant de constater que seules 36 collectivités françaises développent une démarche concernant un agenda 21 (Boutaud, 2017) dont la dimension environnementale est prédominante. La lente reproduction des agendas 21 locaux s'explique d'abord car ils ne sont pas bénéficiés d'un soutien politique important et aussi par le fait que les politiques publiques en France continuent à être à l'époque majoritairement définies par l'État (principalement celles liées à l'énergie) ce qui décourage les initiatives décentralisées et l'expérimentation locale (Emelianoff, 2005). Toutefois, cette tendance change avec la *Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de*

⁷ Les cinq finalités du développement durable sont : 1) la lutte contre le changement climatique et la protection de l'atmosphère ; 2) la préservation de la biodiversité et la protection des milieux naturels et des ressources ; 3) le renforcement de la cohésion sociale, l'emploi et la solidarité entre les territoires et les générations ; 4) l'épanouissement de chacun dans un cadre de vie satisfaisant ; 5) des dynamiques de développement suivant des modes de production et de consommation responsables.

l'Énergie (loi LAURE) de 1996 et la *Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le développement durable du Territoire* (LOADDT ou Voynet) de 1999, lesquelles demandent aux collectivités territoriales de s'intéresser à la prévention de la pollution de l'atmosphère et d'augmenter l'efficacité énergétique. L'adoption des agendas 21 locaux par les collectivités territoriales s'accroît en 2003 après l'adoption de la première stratégie nationale de développement durable (SNDD) pour la période 2003-2008. Est notamment établi comme objectif de reconnaître 500 agendas 21 locaux. La SNDD est mise à jour en 2010 et se propose d'atteindre 1 000 agendas 21 locaux en 2012 pour stimuler un passage vers une économie verte et équitable. Cette stratégie promeut la mise en place de nouveaux agendas 21 locaux sur toute la France mais ceux-ci restent concentrés sur la protection de la biodiversité.

En 2013, la prise en compte locale de la problématique du développement durable reçoit un nouvel élan avec l'élaboration de la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable pour l'horizon 2015-2020 qui a été collectivement élaborée avec le soutien des collectivités territoriales et d'ONG. Cette stratégie souligne l'importance de la participation des collectivités territoriales pour établir une économie verte. Pour y arriver, la stratégie propose trois piliers et neuf axes qui font des collectivités locales le berceau d'actions qui incitent à changer vers une économie circulaire et sobre en carbone, où la recherche et l'innovation servent comme leviers pour créer de nouveaux modèles économiques et financiers, pour faire face aux enjeux environnementaux.

Concernant la lutte contre le réchauffement climatique, et pour atteindre les objectifs relatifs aux émissions de gaz à effet de serre établis lors du Protocole de Kyoto, la France adopte un Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC) en 2000, destiné à réduire les émissions de GES sur la période 2000-2010 mais dont l'impact reste faible, la plupart des mesures n'ayant pas été adoptées (Virlovet, 2015). En 2004, pour faire suite au PNLCC un Plan Climat est adopté. Ces plans conduisent en 2005 à l'adoption de la *Loi de Programmation fixant les orientations de la politique énergétique* (dite Loi POPE) par laquelle la France vise à nouveau le renforcement de la maîtrise de la demande d'énergie, la diversification des sources d'énergie primaire, l'accroissement du soutien aux activités de recherche liées à l'énergie, la préservation de l'environnement, la lutte contre le changement climatique, et la maîtrise du transport et du stockage d'énergie. Aussi, à travers cette loi, différents soutiens aux énergies renouvelables sont mis en place, comme les Certificats d'Economie d'Energie (CEE) mis en place par l'Etat en 2006 pour financer la transition énergétique, ou les Garanties d'Origine (renouvelable). La France se fixe également des objectifs en matière de protection de l'environnement, d'efficacité énergétique, mais aussi d'augmenter la compétitivité économique du pays et de sécuriser l'approvisionnement en énergie. Les objectifs quantitatifs établis par cette loi concernant la lutte contre le changement climatique ciblent une division par quatre des émissions de GES en 2050 (facteur quatre) (Legifrance, 2005). Le Tableau 5 détaille ces objectifs.

Tableau 5 : Objectifs de différentes lois relatives à l'énergie

Date	Loi	Objectifs
30 décembre 1996	Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)	Vise à rationaliser l'utilisation de l'énergie et à définir une politique publique intégrant l'air en matière de développement urbain
25 juin 1999	Loi d'orientation relative à l'administration territoriale de la République (LOADDT ou VOYNET)	Introduit le développement durable dans l'aménagement des territoires
10 février 2000	Loi relative à la modernisation du service public de l'électricité	transpose en droit français la directive européenne de 1996 sur l'ouverture du marché de l'énergie à la concurrence. Ses objectifs principaux sont de chercher l'indépendance et la sécurité d'approvisionnement, la gestion optimale des ressources et la maîtrise de la demande
13 décembre 2000	Loi de solidarité et de renouvellement urbains (SRU)	Promeut la solidarité des territoires, encourage le développement durable et renforce la décentralisation
13 juillet 2005	Loi de Programmation fixant les orientations de la politique énergétique (POPE)	Assure la sécurité d'approvisionnement, maintient un prix compétitif de l'énergie, préserve la santé humaine et l'environnement, garantit la cohésion sociale et environnementale. Fixe des objectifs quantitatifs : <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions : -75 % en 2050 par rapport à 1990, soit 3 % en moyenne par an – Réduction de l'intensité énergétique finale : dès 2015 -2 % par an en moyenne et d'ici 2030 de 2,5 % par an en moyenne – Part des énergies renouvelables : en 2010 10 % des besoins énergétiques couverts par les EnR et 21 % d'EnR dans la consommation intérieure d'électricité, – accroître de 50 % la chaleur renouvelable d'ici à 2010 – incorporer 10 % de biocarburants d'ici le 31 décembre 2015 dans l'essence et le gazole commercialisés à des fins de transport
7 décembre 2006	Loi relative au secteur de l'énergie	Organise le secteur énergétique français concernant l'ouverture du marché de l'énergie à la concurrence, suivant les directives européennes
3 août 2009	Loi relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (Grenelle I)	Formalise les engagements pris pendant les débats du Grenelle de l'environnement à travers 4 axes : lutter contre le réchauffement climatique, préserver la biodiversité, instaurer une nouvelle forme de gouvernance énergétique et préserver la santé et l'environnement. <p style="text-align: center;"><i>Objectifs quantitatifs :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - En 2020 : Réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, 23% des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et réduction de 20% la consommation d'énergie - 2050 : réduction des émissions par quatre
12 juillet 2010	Loi portant engagement national pour l'environnement (Grenelle II)	Opérationnalisation de la loi Grenelle I
7 août 2015	Loi de Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe)	Propose une nouvelle organisation territoriale, en clarifiant les compétences des différents échelles de collectivités territoriales (régions, départements, EPCi)
17 août 2015	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV)	Vise à agir pour le climat, en fixant à la France des objectifs chiffrés et des moyens d'action pour mettre en œuvre l'accord de Paris sur le climat du 12 décembre 2015, ainsi qu'à renforcer l'indépendance énergétique, la sécurité énergétique de la République Française, et la mise en place d'une série des actions pour mener la France vers une économie bas carbone, circulaire et durable <p style="text-align: center;"><i>Objectifs quantitatifs :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - En 2030 : Réduction de 40% des émissions de gaz à effet de serre, 32% des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et réduction de 20% la consommation d'énergie, 40% des énergies renouvelables dans la production d'électricité - 2050 : réduction des émissions par quatre, -50% de la consommation d'énergie finale

En 2007, un grand débat appelé *Grenelle de l'environnement* prend davantage en compte les enjeux climatiques au moment de définir les politiques énergétiques, notamment par une approche plus transversale. Ces débats aboutissent aux *Lois Grenelle I* de 2009 et *Grenelle II* de 2010 qui détaillent les objectifs sectoriels de la lutte contre le changement climatique, ainsi que la mise en conformité des lois françaises avec les textes européens de 2009.

La loi Grenelle I propose des actions comme préserver la biodiversité et essaie de mettre en place des mesures pour limiter les risques pour l'environnement et la santé humaine. La France s'engage entre autres de nouveau dans le facteur quatre, en cohérence avec les recommandations du GIEC de limiter la hausse des températures en dessous de 2 °C adoptées dans le cadre de la COP de Copenhague en 2009. Pour atteindre ces objectifs, une programmation pluriannuelle des investissements (PPI) détaille les actions à prendre en matière de production d'énergie.

La loi Grenelle II est la complémentarité opérationnelle de la loi Grenelle I (Chanard, 2016). Elle décline la politique énergétique dans six grands secteurs : bâtiments et urbanisme, transport, énergie et climat, préservation de la biodiversité, santé et déchets, et gouvernance écologique. Elle demande aussi aux collectivités territoriales de développer un Plan Climat Énergie Territorial (PCET). Le développement et le mode opératoire des PCET suivent comme exemple la démarche des agendas 21 et, dans plusieurs cas, ils les remplacent (Boutaud, 2017).

En 2012, un nouveau débat sur l'évolution du secteur énergétique français a lieu. À cette occasion, le débat est animé par l'urgence de mettre en place des actions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et limiter bien en-dessous de 2°C la hausse des températures en 2100, et la détermination du rôle du nucléaire en France. Après 2011, ce secteur est soumis à de nouveaux enjeux de sécurité suite à l'accident de Fukushima au Japon (F.-M. Poupeau, 2013b). De ces débats est issue la *Loi pour la transition énergétique et la croissance verte* (LTECV) adoptée en 2015.

La LTECV apporte un cadre juridique complet visant à lutter contre le changement climatique et à renforcer l'indépendance énergétique et la sécurité énergétique de la République Française, en envisageant la mise en place d'une série d'actions pour mener la France vers une économie bas carbone, circulaire et durable, et en prenant en compte divers enjeux énergétiques, écologiques et climatiques. Cette loi suit les directives établies dans le «paquet climat-énergie» de l'Union européenne révisé en octobre 2014 (Legifrance, 2015) qui cherche à mettre en place une politique européenne commune d'énergie plus soutenable et durable. Les objectifs de cette loi réaffirment le facteur 4 et l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale en réduisant la part du nucléaire. Est aussi envisagée une réduction de la consommation d'énergie finale et des énergies fossiles. Cette loi tente d'aborder le secteur de l'énergie d'un point de vue global, c'est-à-dire en prenant en compte les quatre grands secteurs d'activité, à savoir l'agriculture, le transport, l'industrie et l'habitat (secteur résidentiel et tertiaire). Par ailleurs, la LTECV introduit pour la première fois le concept d'économie circulaire, qui est introduit comme un modèle économique réduisant l'empreinte environnementale des activités humaines mais garantissant une croissance économique appelée croissance verte (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020).

La *Stratégie Nationale Bas Carbone* (SNBC) est instaurée par la LTECV. Elle fixe les limites des émissions pour chaque période de cinq ans, chaque secteur, chaque polluant, et chaque période jusqu'à 2050 au niveau national. Elle doit permettre à la France d'atteindre la neutralité carbone. La

SNBC fixe ainsi les budgets carbone, qui sont des plafonds d'émission à ne pas dépasser, exprimés par période de 5 ans jusqu'en 2050. Ces budgets sont aussi répartis par grands secteurs, par domaines d'activité et par gaz à effet de serre. La SNBC est soumise à une révision tous les cinq ans pour vérifier si son application reste conforme aux objectifs et, dans le cas contraire, la corriger (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2020b).

Afin de garantir la visibilité des investissements dans le secteur de l'énergie, public comme privé, et faire état des objectifs fixés et des investissements à privilégier, le gouvernement a également élargi sa programmation pluriannuelle des investissements (PPI) à une programmation pluriannuelle des investissements énergétiques. La LTECV crée ainsi les Programmes Pluriannuels de l'Énergie (PPE) afin de piloter la politique énergétique française sur un horizon de 10 ans et d'établir les priorités d'action qui permettront de définir la trajectoire du mix énergétique en cohérence avec les objectifs de transition énergétique (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2019b). La première version fut adoptée en octobre 2016. La PPE fusionne et élargit la portée des outils de programmation distincts existant dans un seul exercice, couvrant la production d'électricité par chaque source de production, y compris les énergies renouvelables, l'équilibre offre / demande, l'efficacité énergétique et la sécurité de l'approvisionnement, afin d'aligner les politiques sur les objectifs fixés par la loi. La PPE doit ainsi prendre en compte les objectifs concernant les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par les budgets carbone (plafonds d'émissions à ne pas dépasser). À travers la LTECV, le périmètre du *Plan Climat-Energie Territorial* (PCET) est élargi et devient le *Plan Climat Air Energie Territorial* (PCAET), lequel intègre les divers enjeux climatiques et énergétiques selon différents axes d'actions : la sobriété énergétique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation au changement climatique, la surveillance et le maintien de la qualité de l'air et le développement des énergies renouvelables.

Plus récemment, en 2019 la France met à jour ses objectifs concernant la décarbonation de son système énergétique à travers la loi relative à l'Énergie et au Climat où elle se fixe des objectifs ambitieux pour sa politique énergétique et climatique s'inscrivant dans l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, ce qui implique une réduction des émissions par six (facteur 6) par rapport à 1990. La mise en place de ces objectifs suit les engagements de la France dans le cadre de l'Accord de Paris et se fait en réponse à l'urgence de réduire les émissions (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2020a). Parmi les objectifs établis figurent :

- la réduction de 40 % de la consommation des énergies fossiles par rapport à 2012,
- l'arrêt de la production basée sur l'usage du charbon à l'horizon 2022,
- l'atteinte de 33 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique en 2030,
- le soutien à la filière hydrogène,
- 20 % d'hydrogène bas carbone et renouvelable dans la consommation totale d'hydrogène en 2030.

Pour atteindre l'objectif de développement des énergies renouvelables, la nation envisage d'allouer un budget de 71 milliards d'euros. Elle prévoit aussi une série de politiques pour lutter contre le gaspillage énergétique dans les bâtiments et réduire la part de l'électricité nucléaire à 50 % en 2035. La loi crée aussi le Haut Conseil du Climat (HCC) qui est chargé d'évaluer la stratégie climatique et l'efficacité de la politique française mise en place pour atteindre ses ambitions. Ensuite, la SNBC est désignée comme l'outil à utiliser pour piloter l'action française. Par ailleurs, la loi donne la possibilité

au gouvernement d'augmenter l'accès à l'énergie nucléaire de 100 TWh à 150 TWh. Les tarifs réglementés du gaz naturel sont supprimés pour toute nouvelle souscription et pour les souscriptions en cours, les tarifs règlementés seront appliqués jusqu'en 2023.

Selon la mise à jour des objectifs prévue dans la loi énergie climat, la SNBC et la PPE sont ensuite actualisées (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2020b). Pour parvenir à la neutralité carbone, plusieurs propositions sont faites :

- décarboner entièrement l'énergie utilisée (sauf pour le transport aérien),
- réduire de moitié les consommations d'énergie dans tous les secteurs,
- réduire au maximum les émissions non énergétiques,
- augmenter et sécuriser les puits de carbone.

À ce sujet, la SNBC formule 45 orientations de politiques publiques pour les acteurs publics, quant à la PPE, elle détaille pour la période 2019-2028 les objectifs permettant d'atteindre les buts de la SNBC.

Finalement, en 2020 la *Loi anti-gaspillage pour une économie circulaire* est adoptée. Elle vise à accélérer le passage vers un système qui limite la production de déchets et préserve les ressources, la santé, le pouvoir d'achat, la biodiversité et le climat, tout en permettant un développement économique et industriel du territoire (Ministère de la Transition écologique, 2020). Cette loi est orientée selon 5 axes :

- sortir du plastique jetable : en 2040,
- mieux informer les consommateurs : pour inciter le passage vers de comportements durables,
- lutter contre le gaspillage et pour le réemploi solidaire : réduire l'utilisation des ressources et inciter la réutilisation de produits,
- agir contre l'obsolescence programmée : augmenter la vie utile des produits et leur réutilisation,
- mieux produire : intégrer des stratégies pollueurs-payeurs pour réduire les déchets polluants.

Ainsi, les divers événements en faveur de l'environnement ont contribué à la conception de politiques et à la fixation d'objectifs qui cherchent à réduire l'impact environnemental des systèmes économiques et énergétiques. Ils également ont contribué à établir des formes de gouvernement plus inclusives. A travers les lois mentionnées dans cette section, la politique énergie-climat de la France s'est en effet progressivement déclinée vers ses territoires. Dans la section suivante, nous allons mettre en lumière comment les collectivités locales ont été intégrées dans les développements et politiques relatifs au domaine de l'énergie.

2.2. La déclinaison territoriale des politiques énergétiques

2.2.1. Premières déclinaisons de la politique énergétique des territoires

Peu à peu les collectivités territoriales redeviennent des acteurs déterminants dans la mise en œuvre de la politique énergétique nationale, étant maîtres de différents leviers locaux : le pilotage (en fixant des objectifs dans les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie ou les projets climat-énergie

territoriaux), la distribution et la production (en tant qu'autorités organisatrices du réseau d'électricité et de gaz, gestionnaires des réseaux de chaleur ou productrices d'énergies renouvelables), et la consommation (en maîtrisant leurs dépenses énergétiques et en incitant les consommateurs à faire de même).

Les premières déclinaisons des politiques relatives à l'énergie et au climat à l'échelle locale ou régionale ont lieu en 1996 avec la loi LAURE, que nous avons évoquée dans la section précédente. Cette loi est née des préoccupations croissantes sur les effets de la pollution sur la santé humaine et sur l'atmosphère (Duruissseau, 2016). Elle remplace la loi de 1961 portant sur la lutte contre la pollution atmosphérique et les odeurs, et complète la loi de 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (J. Faberon, 1997). Elle invite les régions à mettre en place un *Plan de Protection de l'Atmosphère* (PPA), un *Plan Régional pour la Qualité de l'Air* (PRQA) et un *Plan de déplacements urbains* (PDU). Les régions doivent donc surveiller le niveau de leurs émissions et déclencher des alertes si certains seuils sont dépassés. Pour se faire, elles sont incitées à développer des transports propres, à promouvoir l'usage des transports collectifs et à installer des pistes ou voies cyclables lors de la rénovation des voiries ou pendant leur construction. Aucun objectif n'est cependant défini dans le cadre de cette loi. Ces actions ne concernent pas spécifiquement l'énergie, mais les consommations énergétiques étant les principales responsables des émissions, plusieurs d'entre elles concernent ce sujet et affectent la consommation énergétique.

Trois ans après, en 1999, l'État cherche à travers la Loi Voynet à donner une nouvelle organisation et à créer des conditions favorisant l'implémentation du développement durable dans des territoires. Il veut aussi établir une démocratie plus participative. Par conséquent, les préfets de régions et les présidents des conseils régionaux co-pilotent la rédaction du document relatif à l'aménagement du territoire que l'État et les grands opérateurs doivent prendre en compte (F.-M. Poupeau, 2013a). Ainsi, cette loi confère aux régions une compétence d'aménagement et de gestion des services collectifs, en les incluant dans l'élaboration d'un *Schéma des services collectifs* (SSC), services qui comprennent notamment l'énergie (SSCE). Ce schéma est un instrument de l'État pour piloter et orienter les collectivités locales afin d'assurer le suivi des principes de décentralisation. L'objectif du SSCE est de définir le rôle complémentaire des collectivités territoriales face à l'action de l'État. De cette manière, les collectivités territoriales sont amenées à mettre en valeur les énergies renouvelables (par exemple en équipant les locaux publics) ou l'énergie dite « fatale », à exploiter les gisements d'économie d'énergie disponibles à travers différents dispositifs de régulation ou à travers l'extension de la Taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) et enfin, à améliorer les services énergétiques en prévenant tous les risques dus à l'usage de l'énergie (par exemple risque de rupture de l'approvisionnement, risques d'incendie, etc.), en développant les infrastructures, en améliorant le stockage, le transport et la distribution des énergies (Dambrine, 2000). Cet objectif du SSCE vise ainsi in fine à réduire l'impact environnemental de ces collectivités (Ibid.). Ce schéma préconise également la création d'observatoires régionaux de l'énergie (Buessler, 2020). Toutefois, le SSCE consiste davantage en une programmation d'objectifs qu'en une attribution de moyens permettant de s'acquitter de leurs attributions (Boutaud, 2017). Mais ces démarches donnent une place plus grande aux collectivités territoriales dans un domaine jusque-là géré par des acteurs centralisés. De plus, cette loi impose aux régions de développer un Schéma régional d'aménagement et de développement

durable du territoire (SRADDT)⁸ qui « fixe les orientations fondamentales, à moyen terme, du développement durable du territoire régional » (Légifrance, 1999). Ainsi, le SRADDT est un outil de planification qui cherche à ce que les enjeux environnementaux soient intégrés dans les politiques de développement économique des régions.

Dans les années 2000, avec la libéralisation du marché de l'électricité, de nouvelles opportunités se présentent pour augmenter la participation des territoires aux choix énergétiques (Dreyfus & Allemand, 2018). À ce propos, la *Loi du 10 février 2000 relative à la modernisation du service public de l'électricité* introduit les dispositifs de soutien aux énergies renouvelables et traduit une volonté politique de promouvoir la production décentralisée d'électricité, ceci afin de limiter les extensions et renforcements du réseau. Les collectivités locales voient donc leur rôle d'autorités concédantes réaffirmé. Elles peuvent alors développer de nouvelles installations hydrauliques (avec une puissance maximale de 8 000 KVa), ainsi que des centrales de valorisation énergétique des déchets, de cogénération ou de récupération d'énergie, ce qui peut en effet éviter des extensions et renforcements du réseau. Cette électricité doit toutefois être injectée au réseau électrique et ne peut pas être vendue directement aux utilisateurs finaux. La loi introduit aussi une nouvelle compétence pour les collectivités en matière de maîtrise de la demande de l'énergie, elles peuvent notamment faire des subventions pour la rénovation thermique des bâtiments ou pour l'acquisition d'appareils basse consommation ainsi que pour le développement des infrastructures pour la recharge de véhicules électriques (Sénat, 2013).

La *Loi solidarité et renouvellement urbain (SRU)* est également adoptée en 2000. Son but est de promouvoir la solidarité des territoires, d'encourager le développement durable et de renforcer la décentralisation. Les collectivités doivent désormais élaborer un *Plan Local d'Urbanisme (PLU)* et un *Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)* qui doit inclure un *Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD)*. Dans ce contexte, les principaux objectifs de cette loi affectant le système énergétique concernent l'augmentation de la place des transports communs et la réduction de l'usage des véhicules particuliers dans les zones desservies (Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, 2020).

En 2005, la loi POPE réaffirme le rôle des collectivités territoriales en termes de maîtrise de la demande et accorde de nouveaux moyens aux territoires pour exploiter des centrales de production d'énergie dans le cas où ces nouvelles centrales permettent des économies d'énergie ou une réduction des émissions. Ils reçoivent des compétences additionnelles pour soutenir la maîtrise de la demande d'énergie finale (Legifrance, 2005) et notamment ils peuvent dépasser le coefficient d'occupation des sols (avec une limite de 20 %), pour les constructions répondant à des critères de performance énergétique ou comportant des équipements de production d'énergie renouvelable (Sénat, 2013). Ce loi réaffirme aussi la compétence des collectivités territoriales en termes de gestion des réseaux et de fourniture d'énergie car elles peuvent imposer aux délégations d'électricité, de gaz ou de chaleur, ainsi qu'aux concessionnaires, des actions pour réaliser des économies d'énergie (Chanard, 2016).

⁸ Le SRADDT remplace le Schéma Régional du Développement du Territoire (SRADT) instauré par la Loi du 4 février de 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, dite Loi Pasqua.

2.2.2. Les objectifs énergie-climat des territoires

Un renforcement de la décentralisation de la politique énergie-climat survient en 2007 (Nadaï et al., 2015), avec les débats du Grenelle de l'Environnement. Ces débats font participer plusieurs acteurs tant publics que particuliers (représentants de l'État, syndicats, associations, collectivités territoriales, ONG, etc.) dans la définition des actions et politiques en faveur de l'environnement, de l'écologie et de la biodiversité (Andriosopoulos & Silvestre, 2017). L'importance de permettre une exploitation décentralisée et locale d'énergie renouvelable est mise en avant, en synergie avec le système centralisé. Cela forme une base pour une gouvernance locale des systèmes énergétiques territoriaux à travers différents dispositifs (Bertrand & Richard, 2016).

La loi Grenelle I positionne les collectivités territoriales comme acteurs majeurs en matière de conservation de l'environnement et de développement durable (BELOT, 2013) dans la mesure où les collectivités territoriales ont une grande marge de manœuvre sur des activités émettrices de gaz à effet de serre comme le transport ou les bâtiments. Ainsi, l'État tente de les inciter à s'engager dans un programme de rénovation de leurs bâtiments afin de réduire leur consommation énergétique au même rythme que l'État. En outre, il est indiqué que les collectivités territoriales doivent lutter contre le changement climatique en matière d'urbanisme. À cet égard, elles peuvent prescrire dans certaines zones des seuils minimaux de performance énergétique supérieurs à la réglementation. De nouvelles orientations en termes d'utilisation des sols intègrent des principes pour lutter contre le gaspillage d'énergie. Une obligation est également imposée aux collectivités territoriales pour réaliser une étude de faisabilité des énergies renouvelables à l'échelle des zones d'aménagement concerté (ZAC), ce qui donne la possibilité de mettre en valeur la compétitivité de diverses énergies pour la production énergétique, principalement des réseaux de chaleur. Enfin, les collectivités de plus de 50 000 habitants sont incitées à établir un PCET visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 75 % d'ici 2050 et à adapter leur territoire aux effets du changement climatique. L'élaboration du PCET prend comme base l'agenda 21 si le territoire en a adopté un.

La loi Grenelle II instaure un instrument de coordination supplémentaire : le Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE). Celui-ci a pour but de territorialiser les objectifs climat-énergie français et de ressembler les mécanismes de pilotage des politiques publiques concernant l'énergie, l'environnement et le climat (F.-M. Poupeau, 2013a). Le SRCAE est construit à l'échelle régionale et doit établir les orientations en matière d'adaptation au changement climatique, de réduction de la pollution atmosphérique, de développement des énergies renouvelables et d'objectifs de maîtrise de l'énergie. Le PRQA est inclus dans ce dispositif. Un Schéma de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables (S3REN) doit également être développé. Ces schémas déclinent les objectifs nationaux, chaque région étant positionnée comme copilote et non comme seule contractante. Cependant, ces objectifs ne disposent pas de financements dédiés de la part de l'État (F.-M. Poupeau, 2013a). En outre, les PCET de la loi Grenelle I sont des dispositifs volontaires tandis qu'ils deviennent obligatoires dans la loi Grenelle II. Ils restent également des plans opérationnels devant se positionner par rapport aux objectifs établis dans le SRCAE. Un bilan détaillé des émissions de gaz à effet de serre doit désormais être inclus dans ce document de même que les stratégies de réduction. L'ensemble des documents de planification territoriale, c'est-à-dire le SCoT, le PADD et le PLU, doivent tenir compte du PCET. La loi Grenelle II permet aux régions, aux départements et aux EPCI de produire de l'énergie en utilisant des énergies renouvelables dont la production doit être destinée à leur usage propre ou

revendue à EDF (ou tout autre distributeur non nationalisé). La « *revente [est] possible dans le cadre de l'obligation d'achat mais uniquement lorsque les installations sont liées à des équipements affectés à des missions de service public relevant de leurs compétences propres et implantées sur leur territoire et pas au terme du contrat d'achat* ».

Ce sont donc ces deux lois Grenelles qui placent les collectivités territoriales comme des acteurs majeurs de la matérialisation de la politique énergétique nationale : elles leur permettent d'agir en faveur du développement des énergies renouvelables et de la maîtrise de l'énergie.

2.2.3. La transition énergétique au cœur des territoires

Poursuivant les mesures de décentralisation, la *Loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles* (MAPTAM) est adoptée en 2014 et avec la *Loi Nouvelle Organisation Territoriale de la République* (NOTRe) du 7 février 2015.

Tout d'abord, la loi MAPTAM clarifie les compétences de régions, départements, communes et leurs groupements. Les régions sont ainsi reconnues comme cheffes de file pour le développement économique, les aides aux entreprises, les transports, la biodiversité, la transition énergétique et l'Agenda 21. Les départements sont quant à eux chargés de l'action sociale, de l'aménagement numérique et de la solidarité territoriale. Enfin, les communes ont pour responsabilité la mobilité durable et la qualité de l'air. La loi transfère aussi aux métropoles des compétences concernant l'énergie :

- le soutien aux actions pour l'efficacité énergétique et la maîtrise de la demande d'énergie,
- l'élaboration et mise en place des PCET,
- la concession de la distribution publique d'électricité et de gaz,
- la création, l'aménagement, l'entretien et la gestion des réseaux de chaleur et de froid urbain.

La loi NOTRe marque un jalon majeur de la décentralisation, avec un renforcement du rôle des régions et de nouvelles compétences et responsabilités attribuées aux collectivités territoriales. Cette loi demande aux régions françaises d'adopter un *Schéma Régional d'aménagement et de Développement Durable du Territoire* (SRADDET). « *Ce schéma fixe les objectifs de moyen et long termes sur le territoire de la région en matière d'équilibre et d'égalité des territoires, d'implantation des différentes infrastructures d'intérêt régional, de désenclavement des territoires ruraux, d'habitat, de gestion économe de l'espace, d'intermodalité et de développement des transports, de maîtrise et de valorisation de l'énergie, de lutte contre le changement climatique, de pollution de l'air, de protection et de restauration de la biodiversité, de prévention et de gestion des déchets* » (Légifrance, 2015). Le SRADDET rationalise aussi le nombre de documents existants en fusionnant plusieurs schémas sectoriels et doit maintenant intégrer un *Programme Régional pour l'Efficacité Énergétique* (PR2E ou PREE) ainsi qu'un *Schéma Régional Biomasse* (SRB) et un *Schéma Régional Eolien* (SRE), le *Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets* (PRPGD) et le *Plan Régional des Transports* (PRT). Le SRADDET constitue de fait un outil permettant aux régions d'avoir une vision globale de leur territoire et de leur avenir.

En matière d'énergie, la LTECV de 2015 clarifie de nouveaux les rôles des différentes collectivités territoriales à qui sont attribuées de nouvelles responsabilités, et renforce notamment la relation entre régions et intercommunalités. Toujours à la manœuvre en matière de transition écologique et

énergétique et dans l'établissement des objectifs. Les EPCI de plus de 20 000 habitants doivent quant à eux développer un PCAET et c'est aux communes ou aux EPCI que la responsabilité de développer et d'exploiter des réseaux de chaleur ou de froid est donnée, créant ainsi un service public local pour la distribution de ce type d'énergie (Izard, 2016). De plus, les EPCI et les métropoles deviennent les coordinateurs de la transition énergétique de leur territoire, à condition qu'elles aient rédigé leur PCAET. Elles animent et coordonnent des actions en cohérence avec le SRCAE en les adaptant aux caractéristiques de leur territoire. Par ailleurs, il est possible à toute entité publique de développer des installations de production d'énergie utilisant les énergies renouvelables, et de bénéficier de l'obligation d'achat (Pointereau & Mouiller, 2015). D'autres outils financiers qui encouragent les collectivités locales à développer des projets énergétiques sont aussi mis à disposition par cette loi, comme le fonds national pour la transition énergétique ou divers schémas de prêts. Mais aucune solution financière à long terme et durable n'est envisagée (Dreyfus & Allemand, 2018). Les autorités locales n'ont donc pas d'autre choix que de trouver de nouveaux moyens de financement, par exemple en utilisant des formes de coopération comme un financement participatif.

2.2.4. Des engagements plus ambitieux en faveur du climat et de l'environnement

Les lois qui suivent 2015 ne changent pas le rôle des collectivités locales que les lois précédentes l'ont fait, mais elles donnent de nouveaux moyens d'action afin de permettre d'atteindre les objectifs proposés dans leur SRADDET. Pour les collectivités territoriales, la *Loi du 8 novembre 2019 relative à l'Énergie et au Climat* (LEC) permet aux autorités organisatrices de réseaux publics de distribution d'électricité de percevoir des aides pour maîtriser la demande dans les zones rurales (Lenormand, 2019). Ces aides peuvent également être utilisées pour mener des travaux affectant les réseaux de distribution et participant à la transition énergétique ou répondant à des besoins locaux spécifiques. Les collectivités de plus de 50 000 habitants et couvertes par un PCAET peuvent également intégrer dans ce plan un bilan d'émissions de gaz à effet de serre et les actions de transition pour les réduire. Ce bilan carbone est désormais pris en compte au moment de décider les dispositifs de soutien à la production d'électricité et de gaz renouvelables. En outre, cette loi oblige la mise en place d'un schéma directeur des réseaux de chaleur et de froid au plus tard 5 ans après sa mise en service. Les *Communautés d'Énergies Renouvelables* (CER) sont introduites par cette loi. Elles sont définies ainsi : « peut être considérée comme une communauté d'énergie renouvelable une entité juridique autonome qui :

- *Repose sur une participation ouverte et volontaire ;*
- *Est effectivement contrôlée par des actionnaires ou des membres se trouvant à proximité des projets d'énergie renouvelable auxquels elle a souscrit et qu'elle a élaborés. [...]*
- *A pour objectif premier de fournir des avantages environnementaux, économiques ou sociaux à ses actionnaires ou à ses membres ou aux territoires locaux où elle exerce ses activités, plutôt que de rechercher le profit ».*

Elles sont autorisées à :

- *« Produire, consommer, stocker et vendre de l'énergie renouvelable, y compris par des contrats d'achat d'électricité renouvelable ;*

- Partager, au sein de la communauté, l'énergie renouvelable produite par les unités de production détenues par ladite communauté ;
- Accéder à tous les marchés de l'énergie pertinents, directement ou par l'intermédiaire d'un agrégateur ».

Ainsi, les nouveaux objectifs énergie-climat établis par la loi doivent être pris en compte par les différents documents directeurs et outils de planification de la politique énergétique des territoires. Nous donnons un résumé de l'impact de différentes lois sur la politique énergétique de la région dans le Tableau 6. L'articulation entre les différents outils nationaux et territoriaux est résumée dans la Figure 1.

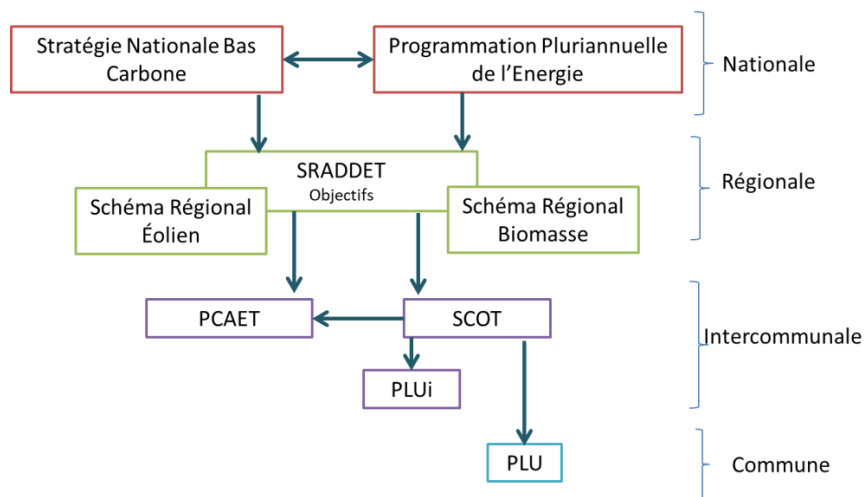


Figure 1 : Outils de planification déclinant la politique énergétique et climatique nationale aux territoires

Tableau 6 : Les lois énergétiques françaises et leur répercussion sur la politique énergétique des territoires

Date	Loi	Outils territoriaux	Conséquence pour les territoires en matière énergétique
8 avril 1946	Sur la nationalisation de l'électricité et le gaz		Préserve la possibilité de détenir des sociétés de distribution et de produire de l'énergie dans trois cas : dans le cadre de réseaux de chaleur, dans un but d'autoconsommation ou à partir de l'énergie hydraulique si la puissance des appareils n'excède pas 8 000 kilovoltampères
30 décembre 1996	Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)	- Plan de protection de l'atmosphère (PPA) - Plan régional sur la qualité de l'air (PRQA) - Plan de déplacements urbains (PDU)	- Surveille la qualité de l'air et déclenche des alertes pour prendre des actions en commun avec l'état - Donne un élan aux transports en commun et aux transports propres
25 juin 1999	Loi d'orientation relative à l'administration territoriale de la République (LOADDT ou VOYNET)	- Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire (SRADDT) - Schémas de services collectifs (SSC) y inclus le schéma de service collectif de l'énergie (SSCE)	- Exploite les gisements d'économie d'énergies - Met en valeur les énergies renouvelables (équipements des locaux publics, valorisation énergétique de l'énergie fatale) - Améliore les services rendus aux usagers : renforcement des réseaux de transport d'énergie, amélioration de stockage, transport et distribution des énergies fossiles.
10 février 2000	Loi relative à la modernisation du service public de l'électricité		- Réaffirme le rôle des autorités concédantes - Ajoute la possibilité de développer toute nouvelle installation des énergies renouvelables qui évite des renforcements ou l'extension des réseaux de transport d'électricité. Seuls les clients non éligibles peuvent être alimentés par l'électricité provenant de ces sources - Réalise des actions pour maîtriser la demande d'électricité
13 décembre 2000	Loi de solidarité et de renouvellement urbain (SRU)	- Plan local d'urbanisme (PLU) - Schéma de cohérence territoriale (SCoT) qui doit inclure un projet d'aménagement et de développement durable (PADD)	- Réduit la place des véhicules particuliers dans les zones desservies par les transports publics
13 juillet 2005	Loi de Programmation fixant les orientations de la politique énergétique (POPE)		- Exploite des nouvelles centrales de production d'énergie dans le cas que ces nouvelles centrales entraînent des économies d'énergie ou des réductions des émissions - Met en place des actions pour soutenir la maîtrise de la demande d'énergie finale. Elles peuvent demander aux délégations d'électricité, de gaz ou de chaleur, ainsi qu'aux concessionnaires, des actions pour augmenter les économies d'énergie
7 décembre 2006	Loi relative au secteur de l'énergie		Renforce le rôle des autorités organisatrices du réseau public de distribution d'électricité en leurs donnant de nouveaux moyens d'organisation qui facilitent l'exercice de leurs compétences.
3 août 2009	Loi relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (Grenelle I)	- Plan Climat Énergie Territorial (PCET - volontaire)	- Élargit les compétences en matière de maîtrise de l'énergie : les collectivités territoriales peuvent mettre en place des normes plus strictes sur la performance énergétique et dans la construction de nouvelles infrastructures - Vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à désigner des stratégies pour adapter les territoires aux effets de changement climatique
12 juillet 2010	Loi portant l'engagement national pour l'environnement (Grenelle II)	- Schéma Régional Climat, Air et Énergie - Plan Climat Énergie Territorial (PCET obligatoire) - les documents de planification et d'urbanisme doivent prendre en compte les PCET (SCoT, PLU, PADD)	- Le SRCAE doit établir les orientations en matière d'adaptation au changement climatique, réduction de la pollution atmosphérique, développement des énergies renouvelables et la définition des objectifs en matière de maîtrise de l'énergie. La production provenant des énergies renouvelables doit être destinée à l'autoconsommation ou revendue à EDF ou un autre distributeur autorisé - Les PCET sont désormais des dispositifs obligatoires pour les collectivités territoriales de plus de 50 000 habitants et ils doivent se positionner par rapport au SRCAE. Il doit intégrer de maintenir un bilan des gaz à effet de serre et les stratégies pour les réduire.
7 août 2015	Loi de Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe)	- Schéma Régional d'Aménagement et du développement durable et d'égalité des Territoires (SRADET)	- Les régions sont cheffes de file pour les compétences relatives « au climat, à la qualité de l'air et à l'énergie », « à l'aménagement et au développement durable du territoire » et « à la protection de la biodiversité »
		- Plan régional de prévention et de gestion de déchets	- Les départements sont chargés de lutter contre la précarité énergétique - Les communes et leurs groupements sont responsables de la mobilité durable et de l'aménagement du territoire - Les régions doivent développer un SRADET. Le SRADET doit intégrer le SRCAE
17 août 2015	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV)	- Plan Climat, Air, Énergie Territoriale (PCAET)	- Le périmètre du PCET est élargi et devient le PCAET : intègre les enjeux climat-énergie à travers différents axes d'actions : la sobriété énergétique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation au changement climatique, la surveillance et le maintien de la qualité de l'air et le développement des énergies renouvelables.
			- Toute installation d'énergies renouvelables est permise et elle peut bénéficier de l'obligation d'achat qui n'est plus réservée aux équipements affectés à des missions de service public

En résumé, dans cette section, nous avons souligné comment progressivement les territoires ont été dotés des compétences nécessaires pour faire évoluer leur système énergétique et contribuer à la maîtrise de la demande, aux objectifs de décarbonation français et au développement des énergies renouvelables. Ainsi, les collectivités territoriales intègrent progressivement ces nouvelles compétences et cherchent à développer leurs territoires en établissant des objectifs ambitieux. Nous allons à présent nous concentrer sur le cas de la région SUD PACA et voir comment elle a intégré peu à peu ces compétences dans sa politique énergétique régionale.

2.3. La politique énergétique et d'économie circulaire de la Région SUD PACA

L'intégration plus marquée de politiques relatives à l'environnement et l'énergie de la part des territoires commence en 1999 à travers la construction des SSC, et plus particulièrement avec le SSCE. La région SUD PACA⁹ en 1999 développe son SSCE (Provence-Alpes-Côte d'Azur, 1999), dans lequel elle cadre sa politique énergétique à travers sept grands axes :

- Mieux connaître et observer ;
- Former, informer, communiquer ;
- Développer l'emploi en soutenant la recherche et les entreprises régionales ;
- Promouvoir la maîtrise de l'énergie en s'appuyant sur les relais locaux ;
- Maîtriser les consommations d'énergie dans les transports ;
- Valoriser les énergies locales disponibles ;
- Développer une offre de qualité sur les énergies traditionnelles.

Sur la base de ces orientations, la région crée l'Observatoire Régional de l'Energie qui est aujourd'hui un des acteurs régionaux majeurs concernant le secteur de l'énergie. Elle commence aussi à s'approprier doucement de la maîtrise de la demande énergétique du territoire et met en place des actions pour réduire la consommation énergétique des divers acteurs dans le secteur de l'habitat. Pour le secteur du transport, la région SUD PACA cherche à déployer principalement des formes de transport alternatives dans les grands villes comme les vélos (avec ou sans assistance électrique). Quant au développement de la production énergétique, il est proposé de structurer la filière bois-énergie, la diffusion du solaire thermique, la valorisation énergétique de déchets et de maintenir le potentiel de production hydraulique. À cette période, la mise en place de solutions pour sécuriser l'approvisionnement électrique de la région était également visée, dans la mesure où l'est de la région n'était alimenté que par une seule ligne à haute tension non-bouclée¹⁰, autrement dit les territoires de l'est étaient dans une situation de péninsule électrique et les risques sur le réseau étaient nombreux, notamment des incendies ou l'incapacité de couvrir les besoins aux heures de pic.

⁹ Depuis 2018, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (région PACA) utilise dans ses documents de communication le nom de région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur (région SUD), d'où notre appellation région SUD PACA.

¹⁰ En 2015, différents travaux ont été réalisés pour sécuriser les réseaux électriques de l'est de la région et garantir l'approvisionnement électrique.

Avec la loi POPE, la territorialisation de la politique énergétique française est renforcée et vise la mise en œuvre d'actions pour faire favoriser l'évolution des systèmes énergétiques des territoires, principalement vers plus de maîtrise de la demande et l'augmentation de l'efficacité énergétique. Cela s'applique particulièrement à la région PACA qui, à partir de 2005, s'engage davantage dans cette démarche (Région PACA, 2011). À ce propos, le plan « Energie 2010 » approuvé en 2005 amorce cette étape, ciblant des objectifs pour promouvoir la maîtrise de la demande et le développement des énergies renouvelables (Pascal, 2005). Ce plan inclut des actions pour sensibiliser les citoyens à des comportements moins énergivores et aide financièrement des projets d'économies d'énergie et de développement de technologies propres, notamment à travers des « chèques énergies renouvelables » (700€ pour l'installation d'un équipement solaire thermique, 7 000€ pour l'installation d'un équipement de solaire photovoltaïque et 100€ pour l'acquisition d'un appareil individuel au bois)¹¹. La région cherche ainsi alors à booster le développement de la production solaire thermique et le solaire photovoltaïque en toiture. Des subventions et du soutien technique sont mis en place pour les installations de chauffage collectif utilisant du bois. Ce plan n'a finalement pas eu la portée attendue : un nouveau plan est lancé en 2006 pour la période 2006 -2010, appelé AGIR « Action Globale Innovante Régionale » puis un second plan AGIR + en 2010 pour la période 2010 - 2015. Ceux-ci déclarent des actions plus ambitieuses en matière de maîtrise de la demande et de développement des énergies renouvelables (RSE&Innovation, 2010). Ils ont principalement comme objectif de consolider le financement des divers projets. Il en résulte le financement de la production de 22 GWh provenant des énergies renouvelables. Cette production ne représente même pas 1 % de la consommation électrique de la région à l'époque (Degremont, 2018).

En matière de rénovation des bâtiments, la région rénove 10 % des habitations à loyer modéré, ce qui correspond aux objectifs établis. La région décline ensuite sa politique à travers une contractualisation de la mise en place de la politique énergétique régionale sur ses territoires, avec un accompagnement conditionné aux directrices déterminées, ainsi qu'à travers un suivi de la mise en œuvre des divers dispositifs (Degremont, 2018). Ces plans ont donné un élan important à la politique énergétique régionale, démontrant la volonté de prendre en main l'évolution du système énergétique régional.

Le SRCAE de la région PACA est adopté en juin 2013 et a comme objectif principal d'intégrer les objectifs européens et français au niveau régional (Région Provence-Alpes-Cote d'Azur, 2013a). Ce schéma représente l'opportunité d'affirmer la volonté de devenir un territoire propre, sobre en carbone, de développer davantage les ressources renouvelables présentes sur le territoire, de bien maîtriser la demande énergétique, ainsi que de faire face aux défis énergétiques présents sur le territoire. La région se donne donc comme ambition la recherche de solutions innovantes qui la distingueraient des autres collectivités (Degremont, 2018). Le soutien qui s'ensuit des projets Flexgrid qui vise le déploiement à grande échelle des systèmes énergétiques ou encore plus tard Jupiter 1000, le premier démonstrateur industriel français de power-to-gas en sont des illustrations. Cette volonté est présente dans les objectifs établis, qui envisagent une consommation énergétique couverte à 30 % par les énergies renouvelables avec une réduction de la consommation finale d'énergie de 25 % en 2030 par rapport à 2007. Cette réduction de la demande visée nécessite d'inciter les citoyens à prendre conscience de leurs comportements énergivores et à mettre en place des actions de réduction des consommations. Pour le

¹¹ <http://www.ecologie-pratique.org/article.php/20050615111807673>

secteur du transport par exemple, la région souhaite couvrir 50 % des déplacements dans les centres urbains par des modes actifs comme le vélo ou la marche. D'autres actions proposées dans le SRCAE cherchent à exploiter les solutions technologiques pour réduire la consommation énergétique comme dans l'industrie ou dans le secteur résidentiel avec la rénovation thermique des bâtiments. En termes de production d'énergie, la région cible principalement le développement des technologies solaires abondantes (notamment pendant la période estivale) pour la production d'électricité et l'utilisation du bois pour la production de chaleur. Il faut noter que la définition des objectifs ne suit pas d'étude de potentiels mais plutôt l'ambition de la région d'établir des priorités politiques et dessiner une vision qui appelle à l'action et à la mobilisation de tous les acteurs locaux. Les autorités régionales espèrent ainsi générer une coalition territoriale autour de l'énergie et de l'environnement et à augmenter l'attractivité de leur territoire (Degremont, 2018).

En 2015, suite à la loi NOTRe qui met en place le SRADDET, la région saisit cette opportunité pour renforcer son engagement, prendre des actions en faveur de l'environnement, du climat et de l'épanouissement de son territoire, ainsi que pour montrer sa volonté de contribuer à la transition énergétique du pays. Fin 2017, après l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris sur le climat, la région adopte un plan climat contenant des objectifs et des ressources financières visant à placer la région comme un exemple en matière d'environnement à l'intérieur du pays et au niveau européen (Région SUD, 2017b). Ce plan a tout d'abord un sens opérationnel et agit sur le transport, l'énergie, le développement des entreprises ayant comme objectif de travailler pour l'environnement, la protection de la biodiversité et le bien-être. Ce plan inclut aussi des initiatives appliquant des principes d'économie circulaire, telle que la promotion du recyclage, de l'écoconception et de l'écologie industrielle. Un bilan des actions réalisées à travers ce plan climat est présenté en 2019 et établit que la région a fortement mobilisé toutes ses ressources et qu'une grande partie des objectifs a vu leur développement avancer considérablement (Région SUD, 2019).

En 2019, le premier SRADDET de France est adopté en région SUD PACA. Dans ce schéma (présenté plus précisément dans l'Annexe 1), la région SUD PACA déploie sa stratégie ambitieuse pour « *bâtir un nouveau modèle d'aménagement du territoire* » et expose précisément ses orientations en matière d'économie circulaire et les politiques proposées pour y parvenir. Elle indique que l'économie circulaire est une stratégie qui va aider à la gestion des ressources, à la prévention des déchets, ainsi qu'à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour la région, l'application d'une « *économie de la ressource* »¹² doit aussi permettre la création d'activités économiques non délocalisables conduisant à des emplois durables. Les principales stratégies d'économie circulaire de la région favorisent des actions pour changer la manière de produire et de consommer, notamment à travers la mise en place de l'écoconception, le déploiement de l'écologie industrielle et l'offre de nouvelles options de consommation, particulièrement l'application d'une économie de la fonctionnalité. Les politiques mentionnées pour améliorer la gestion de déchets passent entre autres par une augmentation du recyclage et sa valorisation. La trajectoire vers une économie circulaire comprend également la réduction de 10 % de la production de déchets non dangereux en 2025 par rapport à 2010, et l'augmentation de 10 % de la quantité des déchets faisant l'objet de prévention dans le secteur du bâtiment et des travaux publics.

¹² Pour la région, l'expression « économie de la ressource » est une autre façon de désigner l'économie circulaire.

L'application d'actions d'économie circulaire de la région sont surtout des initiatives venant de différentes entreprises : même si la région est de plus en plus présente sur ces démarches d'EC par exemple avec le soutien des Chambres de Commerce et de l'Industrie (CCI) de la région, elle n'est généralement pas à l'origine des actions et projets. Un exemple d'initiative d'économie circulaire consiste en la récupération et l'utilisation des déchets provenant d'un fabricant des vitres par une entreprise de voiries pour la construction de routes, ou encore, la substitution d'énergies fossiles par des déchets pour la production d'énergie dans les cimenteries. Les initiatives déployées dans le territoire répondent bien évidemment à des motivations économiques : cependant, le manque d'une réglementation claire et d'aides financières suffisantes conduit parfois à l'abandon de certaines d'entre elles.

Plus récemment, la région a adopté en 2020 le Plan régional hydrogène (Region SUD, 2020) sur lequel elle voudrait s'appuyer pour renforcer son engagement à arriver à la neutralité carbone. Elle trouve dans le déploiement de l'hydrogène une opportunité pour pousser le développement de la filière dans la région mais aussi favoriser le celui de la production solaire, et la décarbonation de sa consommation énergétique. Elle cherche principalement à introduire l'hydrogène dans le secteur du transport et de l'industrie et se fixe des objectifs à l'horizon 2027 et 2032.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'évolution de la façon de gouverner le système énergétique en France. Dans un premier temps, le système énergétique est constitué par de petites unités de production proches des villes. Ces développements sont guidés par des actions privées avec l'encadrement et le soutien politique des collectivités locales. Ces dernières voient leur position, alors forte, s'affaiblir avec un système électrique interconnectant des points de consommation de plus en plus éloignés. Cela nécessite une intervention de l'État pour encadrer des tarifs et synchroniser le système. Après la deuxième guerre mondiale, l'État prend définitivement la main sur le développement du système électrique, car la reconstruction du système exige alors de grands investissements et que l'énergie constitue une ressource stratégique pour le développement du pays. La centralisation du système énergétique s'achève ainsi complètement. Cette logique de centralisation est renforcée après le choc pétrolier de 1973 avec le développement du nucléaire. Vers la fin du vingtième siècle, le modèle centralisateur est cependant remis en question, en raison d'abord de l'ouverture du marché européen à la concurrence mais aussi des événements relatifs à la protection de l'environnement et à la lutte contre le réchauffement climatique qui appellent la mise en place d'un nouveau paradigme pour les systèmes énergétiques de demain.

Il en résulte qu'à partir des années 2000, les collectivités locales sont davantage sollicitées au moment de l'établissement des politiques visant le développement du système énergétique. Ce n'est cependant qu'en 2005 que la déclinaison des politiques énergétiques vers les territoires atteint un nouveau jalon avec la loi POPE. À partir de ce moment, les collectivités locales portent la en place des actions pour réaliser des économies d'énergie et pour mieux maîtriser leur consommation énergétique. La déclinaison de politiques énergétiques vers les collectivités locales est renforcée avec les lois Grenelle qui demandent aux régions de développer des schémas où elles doivent se fixer des ambitions à long terme pour décarboner leur système énergétique en cohérence avec les objectifs énergie-climat nationaux et européens. En 2015, la LTECV rénove profondément les outils de gouvernance nationale et territoriale

pour permettre une définition plus partagée des politiques et objectifs énergétiques. Ainsi, les moyens d'action des collectivités territoriales sont clarifiés et renforcés. Avec la loi NOTRe, les compétences de collectivités territoriales sont modifiées en donnant aux régions françaises la responsabilité en matière d'énergie, air, environnement, et d'adaptation au changement climatique et demande aux collectivités d'adopter un SRADDET. Ce dernier doit inclure des objectifs de transition vers une économie circulaire et doit prendre en compte les directives établies dans la SNBC et la PPA pour l'établissement des objectifs énergétiques.

Ainsi, aujourd'hui, les régions sont un des acteurs qui jouent un rôle clé au moment de matérialiser la transition énergétique et le passage vers des territoires plus respectueux de l'environnement. En particulier avec le développement des solutions durables, notamment des énergies renouvelables, les territoires français deviennent des acteurs très importants car ils peuvent coordonner des actions autour de différents secteurs interdépendants (par exemple urbanisme, mobilité, entre autres). Il leur est également possible d'établir des solutions spécifiques selon la réalité du territoire, en termes de structure économique et de disponibilité des ressources. Les collectivités territoriales peuvent également répondre aux défis énergétiques spécifiques du territoire et mettre en valeur leurs potentiels énergétiques.

Nous avons pu relever les effets de ces déclinaisons de politiques au niveau de la région SUD PACA qui a déployé une série de politiques pour promouvoir le développement d'un système énergétique plus durable et responsable environnementalement. Plus récemment, la région a annoncé son ambition d'être la première région de France neutre en carbone à l'horizon 2050, en se fixant en particulier pour cela des objectifs très ambitieux de développement des énergies renouvelables (en particulier le photovoltaïque, l'éolien flottant et le gaz renouvelable) et d'efficacité énergétique. Elle compte également s'appuyer sur le développement de la filière hydrogène ou encore de valorisation de la chaleur pour renforcer ses moyens de décarbonation du système énergétique régional.

En outre, nous avons pu constater que le concept d'économie circulaire est de plus en plus mentionné dans la politique environnementale de la France et des régions, notamment dans la LTCEV qui introduit le concept et dans la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire qui vise un déploiement plus important de l'économie circulaire dans le pays. La région SUD PACA a également mentionné l'économie circulaire dans son SRADDET. Ainsi, pour mieux comprendre ce que recouvre et implique l'économie circulaire, le chapitre suivant analysera plus en détail ce concept qui a pris de l'ampleur dans la politique du pays mais aussi au niveau international.

Chapitre 3 – L'économie circulaire : Principes, Objectifs, Définition

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué les problèmes environnementaux et climatiques qui affectent gravement la planète et nos sociétés, ainsi que les rapports (Meadows et al., 1972) et (Brundtland, 1987) qui appellent à un changement de nos systèmes économiques où la croissance ne serait plus synonyme d'épuisement des ressources et de répercussions environnementales. Le deuxième quant à lui a mis en évidence l'évolution des politiques françaises pour en tenir compte et s'insérer davantage dans une perspective de durabilité. C'est cette ambition que nous avons notamment pu relever dans la LTECV et dans le SRADDET de la région SUD PACA sur laquelle nous centrons notre attention dans ce travail. Parmi les mesures envisagées, l'« *Economie circulaire* » apparaît comme stratégique pour réduire l'empreinte environnementale des activités économiques, notamment à travers la diminution de la consommation des ressources et la production de déchets, ainsi que le passage à un système circulaire.

En effet, le modèle économique actuel repose principalement sur un fonctionnement linéaire allant de l'extraction de matières premières – ressources destinées à être utilisées comme intrants et qui seront ensuite transformées (avec des technologies et de la main d'œuvre) en produits ou pièces – à la transformation en produits intermédiaires ou finaux jusqu'à la distribution (la vente) aux usagers (clients) finaux. Ces produits seront utilisés tout au long de leur vie utile et seront remplacés dès que l'objet aura accompli son usage ou qu'un nouveau produit apparaîtra sur le marché avec de meilleures fonctionnalités remplaçant ainsi ceux devenus obsolètes. Les produits obsolètes sont alors jetés dans des décharges ou incinérés, aggravant ainsi les répercussions sur l'environnement en polluant les sols et en émettant des gaz à effet de serre (quand il restent accumulés dans les décharges ou par la production d'émissions lors de leur combustion), mais aussi en obligeant l'extraction de nouvelles matières premières pour produire d'autres biens (Andersen, 2007). A cela s'ajoute, les déchets et les polluants produits tout le long du processus de production, ce qui aggrave là-encore les répercussions sur l'environnement. Ainsi, pour réduire les impacts de la croissance économique sur l'environnement, il convient notamment de réfléchir à une meilleure gestion non seulement des ressources tout le long du processus de production et de consommation, mais aussi des stocks, en évitant d'augmenter les flux de ressources.

Dans cette optique, le concept d'économie circulaire (EC) apporte une vision prometteuse de conciliation de la croissance économie et de l'environnement car il envisage la transformation de l'économie linéaire en une boucle où est recherchée la réduction de la consommation des ressources et de la production de déchets, par la transformation des déchets d'un procès en ressources à utiliser par un autre. Les ressources s'utilisent ainsi continument, leur gaspillage est minimisé de même, de fait, que la pollution. Cette approche constitue le socle commun du concept d'économie circulaire, mais sa définition est loin de relever d'un consensus, son origine s'étant nourrit d'influences de plusieurs disciplines, ce qui rend également difficile parfois la détermination précise de ses principes et objectifs et qui fait que sa compréhension diverge selon différents acteurs.

Dans ce contexte, cette revue de littérature permet de retracer l'histoire de l'EC et ainsi mettre en avant les concepts utilisés pour construire la compréhension actuelle du concept d'EC, ses principes et enfin de poser sa définition.

3.1. L'émergence du concept d'économie circulaire

La première évocation des principes d'EC, sans forcément mentionner les termes « économie circulaire » ni un nouveau cadre économique, est attribuée à Kenneth E. Boulding dans les années 1960. Dans son article « *The economics for the coming Spaceship Earth* » (Boulding, 1966), il fut ainsi le premier à suggérer l'idée d'un « *système écologique cyclique qui est capable de reproduire en continu des matériaux* » (Ellen MacArthur Foundation, 2013b; Winans et al., 2017). Boulding énonce alors que la Terre ayant des réservoirs limités de ressources et que la pollution ne pouvant pas être totalement absorbée par la nature, nous devons prendre des mesures pour prévenir la pénurie de matières premières et réduire la pollution de l'environnement, qui pourraient causer de plus grands problèmes à la société à l'avenir. Le rapport du Club de Rome, « *Halte à la croissance* » (Meadows et al., 1972), précise lui-aussi quelques années plus tard qu'au taux de croissance actuel, le monde sera confronté à des problèmes pour répondre aux besoins de l'humanité car les ressources se raréfieront et l'environnement ne suffira pas à absorber toute la pollution produite. Les auteurs présentent alors l'idée d'un « *état d'équilibre de croissance* », où la pollution est limitée et les matériaux recyclés plus souvent, diminuant ainsi leur taux d'épuisement. Plus tard, (Stahel, W.R. and Reday G., 1976) présentent dans leur rapport pour la Commission européenne « *The Potential for Substituting Manpower for Energy* », une économie en boucle qui augmenterait l'efficacité de l'utilisation des ressources et empêcherait la production de déchets. Quelques années plus tard, ils suggèrent l'idée de vendre l'usage des produits plutôt que la possession de ces derniers et d'augmenter la durée de vie des biens, afin d'avoir des revenus durables et de diminuer les déchets ultimes produits par la consommation de biens.

Le terme d'économie circulaire est quant à lui mentionné pour la première fois par Pearce et Turner en 1990 dans leur ouvrage « *Économie des ressources naturelles et de l'environnement* » où ils déclarent que le système économique actuel menace l'environnement en le transformant en un réservoir de déchets, car les activités de production produisent continuellement des déchets et pollutions. Le système devrait alors être transformé en un système circulaire en considérant les déchets comme une source de ressources à exploiter (Geissdoerfer et al., 2017; Ghisellini et al., 2016; B. Su et al., 2013). Ainsi, l'EC est née comme une solution qui aiderait à réduire les tensions sur les ressources et les effets néfastes sur l'environnement. Pour autant, sa définition se complexifie au grès des influences venant de nombreuses autres disciplines, des différentes parties prenantes privées et publiques (Wautelet, 2018).

3.1.1. Concepts et disciplines qui ont servi de base à la construction du concept d'économie circulaire

Malgré une inspiration initiale commune sur la nécessité d'une meilleure gestion des ressources naturelles et de réduire la pollution, qui fait émerger les bases d'un modèle économique alternatif, l'économie circulaire a évolué dans son périmètre et ses principes jusqu'à aboutir à différentes définitions et principes (que nous discuterons plus en détail dans la section 3.1.2). Le manque de consensus quant à la définition

de l'EC s'explique dans un premier temps par les nombreuses disciplines qui ont été prises comme base pour sa création (Bocken, Olivetti, et al., 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2013b). Dans cet esprit, l'EC peut être considérée comme un concept parapluie, c'est-à-dire qu'elle peut créer une relation entre différents concepts préexistants qui n'étaient pas liés directement, en concentrant l'attention sur une qualité ou une caractéristique partagée particulière des concepts qu'elle englobe (Blomsma & Brennan, 2017; Murray et al., 2017). En ce sens, l'EC a une fonction catalytique car elle crée une plateforme qui permet une discussion sur l'application appropriée des disciplines visant à concilier environnement et activités économiques en contribuant aussi à combler le manque de connaissances sur ce qui constitue des pratiques de gestion des ressources significatives et exploitables (Blomsma & Brennan, 2017).

Ainsi, de nombreuses disciplines ont contribué à la construction du concept d'EC. (Yuan et al., 2006), parmi les premiers auteurs à avoir fait une critique de l'EC, précisent qu'en Chine, l'EC a été fondée à partir de différentes disciplines ou approches telles que l'économie industrielle, l'ingénierie des systèmes, la bionique, la production propre et la physique, et son application reposait sur trois approches : production propre, écologie industrielle et modernisation écologique. (Andersen, 2007; B. Su et al., 2013) ont quant à eux cité l'écologie industrielle comme discipline fondatrice de l'EC. La Fondation Ellen MacArthur (FEM) (Ellen MacArthur Foundation, 2013a), l'un des plus grands promoteurs de l'EC dans le secteur privé, a identifié sept concepts ou disciplines qui ont été utilisés pour construire le concept d'EC : l'écologie industrielle, du berceau au berceau (plus connu sous son appellation anglaise *cradle to cradle*, C2C), le biomimétisme, l'économie de la performance, l'économie bleue, la conception régénératrice et la permaculture. Plusieurs autres auteurs ont réaffirmé l'influence de l'écologie industrielle et des écoles de pensée proposées par la FEM comme (Ghisellini et al., 2016). Un autre concept qui s'ajoute pour créer celui d'EC est le capitalisme naturel (Ezzat, 2016; Lewandowski, 2016). Plus récemment, d'autres auteurs ont rassemblé d'autres disciplines qui ont été utilisés pour construire le concept d'EC, comme (Masi et al., 2017) qui donnent une liste exhaustive de disciplines et de concepts utilisés comme antécédents de l'EC. Cette liste comprend la production plus propre, la dynamique du système, la pensée systémique, le zéro émission, l'économie industrielle, la symbiose industrielle, l'économie écologique, l'économie environnementale et l'économie en régime permanent. Il existe également d'autres disciplines mentionnées dans la littérature comme les sciences de l'environnement (Merli et al., 2018), le réseau éco-industriel (Winans et al., 2017), la bioéconomie (D'Amato et al., 2017) et les écosystèmes industriels (Korhonen et al., 2018). Ces derniers concepts sont moins présents dans la littérature et peuvent être regroupés dans le concept détaillé par la FEM. Par exemple, les réseaux éco-industriels et les écosystèmes industriels sont des concepts qui correspondent à la discipline de l'écologie industrielle (Roberts, 2004). Finalement (Wautelet, 2018) énonce cinq principales écoles de pensée qui ont influencé le concept d'EC, notamment l'écologie industrielle, le berceau au berceau, l'économie de la performance, l'économie bleue et le biomimétisme. Dans le Tableau 7, nous proposons une liste des principales disciplines qui ont inspiré l'EC avec leur définition la plus acceptée.

Tableau 7 : Idées et concepts qui ont servi à la construction du concept de l'EC

	Champ de recherche	Définition	Référence
1	Écologie industrielle	Etudie les flux de matières et d'énergie résultant des activités humaines fournissant la base pour développer des approches pour boucler les cycles de telle manière que l'impact écologique de ces activités soit minimisé	(Lazarevic & Valve, 2017)
2	Symbiose industrielle	Engage des industries traditionnellement séparées dans une approche collective de l'avantage concurrentiel impliquant l'échange physique de matériaux, d'énergie, d'eau et/ou de sous-produits	(Chertow, 2000)
3	Métabolisme industriel	« <i>Vise à comprendre la circulation des flux (et stocks) de matières et d'énergie liés à l'activité humaine, depuis leur extraction à leur inévitable réintégration dans les cycles biogéochimiques globaux</i> » avec un approche de conservation de la matière	(Suren Erkman, 2004)
4	Production plus propre	Application continue d'une stratégie environnementale préventive intégrée aux processus, produits et services pour augmenter l'efficacité globale et réduire les risques pour les humains et l'environnement	(United Nations Environmental Programme, 2007)
5	Berceau à berceau (Cradle to cradle)	Conception et production de produits de tous types de telle sorte qu'à la fin de leur vie, ils puissent être réellement recyclés (upcyclés), imitant le cycle de la nature avec tout ce qui est soit recyclé soit renvoyé à la terre, directement ou indirectement par l'alimentation, en tant que produit totalement sûr, non toxique, et nutriment biodégradable	(Sherratt, 2013)
6	Biomimétisme	Conception et production de matériaux, de structures et de systèmes s'inspirant des solutions adoptés par la nature	(Benyus, 1997)
7	Économie de la fonctionnalité (Performance Economy)	« <i>Consiste en la substitution de la vente de l'usage d'un bien à la vente du bien lui-même</i> »	(Stahel, 2019)
8	Économie bleue	« <i>Modèle économique qui ne produirait pas de déchet ni d'émission et qui aurait un impact positif sur la création d'emplois sans coûter plus cher que les modèles économiques actuels</i> »	(Compte CO2, n.d.)
9	L'économie du partage ou économie collaborative	« <i>Système socio-économique permettant un ensemble intermédiaire d'échanges de biens et de services entre individus et organisations qui visent à accroître l'efficacité et l'optimisation des ressources sous-utilisées dans la société</i> »	(Hossain, 2020; Muñoz & Cohen, 2017)
10	Économie écologique	« <i>Approche originale de l'économie qui a la particularité de tenir compte des limites naturelles de la planète et de la réalité sociale dans ses analyses et équations</i> »	(Maréchal, 2011)
11	Economie de l'environnement	Introduction des externalités environnementales dans les fonctions économiques et l'élaboration de politiques afin de permettre la poursuite de la croissance économique tout en les réduisant	(Gendron, 2014; Murray et al., 2017)
12	Permaculture	Paysages conçus consciemment qui imitent les modèles et les relations trouvés dans la nature, tout en produisant une abondance de nourriture, de fibres et d'énergie pour répondre aux besoins locaux	(Holmgren, 2002)
13	Capitalisme naturel	Système de quatre principes interconnectés, où les intérêts commerciaux et environnementaux se chevauchent, et dans lequel les entreprises peuvent mieux satisfaire les besoins de leurs clients, augmenter leurs profits et aider à résoudre les problèmes environnementaux en même temps. Système économique incitant au profit basé sur une protection appropriée de l'environnement et attribuant une valeur économique à la gestion de la planète.	(Lovins et al., 1999)
14	Dynamique des systèmes	Méthodologie et discipline pour la modélisation, la simulation et le contrôle des systèmes dynamiques. L'accent principal est mis sur le rôle de la structure et sa relation avec le comportement dynamique des systèmes, qui sont modélisés comme des réseaux de boucles de rétroaction fermées d'un point de vue informationnel entre les variables de stock et de flux.	(Schwaninger, 2009)
15	Conception régénératrice	Cherche non pas à réduire les dommages causés par les nouveaux développements, mais à faire fonctionner la conception et la construction en tant que forces positives qui réparent les systèmes naturels et humains	(Hutton, 2021)

Ainsi, nous avons relevé les principales recherches qui spécifient de quoi s'est nourrie l'économie circulaire de son émergence à son insertion dans les politiques, ainsi que les études scientifiques et ses applications. Ces nombreuses disciplines partagent l'idée de transformer la manière dont les humains conçoivent la croissance économique, en termes de production et de consommation, ainsi que la façon de concevoir les déchets, non pas comme une chose indésirable mais comme une source potentielle de ressources à exploiter. Surtout, ces disciplines partagent la vision de concevoir une croissance économique plus respectueuse de l'environnement. Il est possible de dire que l'idée principale donnée par ces disciplines à l'EC est que l'économie actuelle doit prendre en compte l'impact de leurs activités sur l'environnement, de sorte qu'une utilisation plus efficace des ressources dans la production et la consommation doit être atteinte par une meilleure conception des systèmes de production et des produits, et par de nouveaux modèles économiques qui prennent davantage en compte la relation avec les clients.

3.1.2. L'apport des différents courants à la construction de l'économie circulaire

L'économie circulaire est un concept qui est encore en construction et sa définition n'est pas encore consensuelle (Homrich et al., 2018; Kalmykova et al., 2018; Merli et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018; Wautelet, 2018) en raison des nombreux courants environnementaux qui l'ont inspiré même si la relation entre l'EC et ces disciplines reste abstraite (Blomsma & Brennan, 2017). Dans ce contexte, cette section vise à analyser comment chacune de ces disciplines a effectivement influencé la construction du concept d'EC.

3.1.2.1. Les disciplines cherchant une production plus efficace dans la gestion des ressources et plus respectueuse de l'environnement

L'écologie industrielle, le métabolisme industriel, la symbiose industrielle et la production plus propre sont regroupés dans cette catégorie car ils ont comme objectifs communs en particulier de chercher, dans le secteur de la production, des alternatives qui permettent une maximisation de l'utilisation des ressources, de diminuer la production des déchets et la contamination, réduisant de cette manière les impacts négatifs envers l'environnement et en poursuivant une croissance économique.

Ainsi, l'écologie industrielle tente de construire un système industriel conçu comme un sous-système de l'environnement, avec lequel les interactions créent un système interconnecté où les matériaux et l'énergie peuvent circuler tout en minimisant l'impact écologique des activités (Lifset & Graedel, 2015) avec une meilleure performance économique (S. Erkman, 1997). Certains principes que l'écologie industrielle devrait suivre sont décrits par (S. Erkman, 2001). Premièrement, dans une écologie industrielle, les déchets d'une entreprise doivent être utilisés par une autre, changeant le paradigme relatif au déchet qui devient une ressource ; les produits doivent être conçus de manière à minimiser leurs effets nocifs, à garantir une qualité égale ou supérieure de produits et services offerts, tout en minimisant l'utilisation de matériaux tout au long du cycle, et enfin, à réduire l'utilisation de combustibles fossiles. L'écologie industrielle intègre l'utilisation du métabolisme industriel qui analyse le cycle des ressources à partir de leur processus d'extraction et la manière de les réintégrer dans l'environnement à la fin de leur

cycle de vie. Un autre concept intégré à l'écologie industrielle selon (Valenzuela-venegas et al., 2016) est la symbiose industrielle, qui a pour objectif d'interconnecter différentes industries afin d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources en termes de matériaux, d'énergie ou d'autres synergies qui profiteraient aux procédés industriels pour réduire l'impact sur l'environnement et maintenir ou augmenter leur performance économique. Dans une perspective de symbiose industrielle, les parcs éco-industriels sont particulièrement propices car la proximité géographique permet un meilleur échange de ressources et réduit l'énergie utilisée pour leur transport. La production plus propre est quant à elle vue comme une méthodologie pour atteindre les objectifs de l'écologie industrielle (Berkel & Willems, 1997). Ainsi, l'écologie industrielle intègre dans son concept celui du métabolisme industriel, de la symbiose industrielle et de la production plus propre, qui cherchent ensemble à réduire les effets néfastes sur l'environnement des activités industrielles grâce à un nouveau paradigme de production qui réduirait l'utilisation des ressources, tels que matériaux, énergie et eau, et augmenterait aussi la rentabilité (Saavedra et al., 2018). De cette manière, l'écologie industrielle a influencé l'EC en proposant d'utiliser les déchets d'un processus comme ressource pour un autre processus, en faisant référence aux systèmes, en mettant en œuvre des synergies entre les industries et en intégrant de nouveaux paradigmes de conception qui réduiraient le fardeau environnemental des activités de production et l'utilisation des produits.

3.1.2.2. Du berceau au berceau

Le concept de « berceau au berceau » fait référence à la transformation de la manière dont les processus industriels et les biens sont conçus, de sorte qu'à la fin de leur cycle de vie, il soit possible de récupérer les matériaux utilisés et de les utiliser soit comme nutriments biologiques pour les réinsérer dans l'environnement, soit comme ressources techniques pouvant être utilisées pour produire de nouveaux produits. Cette méthode veille à ce que les matériaux demeurent des ressources tout au long de leur cycle de vie, de leur extraction à leur retour vers l'environnement en tant que nutriments. Cette approche se différencie de celle du « berceau à la tombe » où la plupart des ressources au moment de leur fin de vie deviennent de déchets (McDonough & Braungart, 2002).

La discussion principale autour du concept de berceau au berceau est la différence entre « éco-efficience » et « éco-efficacité ». La première cherche à minimiser les émissions, à diminuer l'utilisation des ressources et à réduire l'impact environnemental, tandis que la seconde cherche à changer les produits et les matériaux associés afin de créer un cycle où ces ressources peuvent être réinsérées dans la chaîne de production ou dans l'environnement comme ressources biologiques (Braungart et al., 2007). Ces mêmes auteurs soutiennent également que dans un paradigme d'« éco-efficience », le recyclage des produits qui ne sont pas bien conçus pour être recyclés réduira la qualité des matériaux, diminuant leur valeur au fil du temps, tandis que dans un paradigme d'« éco-efficacité », les ressources conserveraient leur valeur à chaque processus et pourraient être utilisées en permanence. Ils soulignent donc l'importance de concevoir des produits et des processus en fonction de cette perspective. De plus, (McDonough & Braungart, 2002) proposent quelques principes que le berceau au berceau doit suivre :

- « Les déchets sont de la nourriture », ce qui signifie que toute ressource précédemment appelée déchet doit être transformée en un intrant pour une nouvelle ressource.

- « Créer de la diversité » signifie que les processus industriels doivent créer des connexions différentes avec différentes ressources, différentes parties prenantes et différentes cultures afin de créer un système plus résilient.

De plus, pour atteindre « l'éco-efficacité », la relation produits–consommateurs doit être réinventée, en changeant la manière dont les producteurs interagissent avec les systèmes écologiques, sociaux et économiques. La vente de l'usage de produits, plutôt que de produits est recommandée comme une bonne stratégie pour atteindre un cycle berceau-berceau.

Ainsi, l'EC a pris du berceau au berceau le fait que le système de production doive repenser les activités de production et la façon dont les produits sont fabriqués afin de faciliter la réutilisation des matériaux impliqués à la fin de leur cycle de vie, soit comme matières premières ou comme nutriments biologiques, en concevant ainsi les boucles que les ressources doivent suivre.

3.1.2.3. Économie de la performance

L'idée principale derrière l'économie de la performance est une transformation complète du paradigme entourant la vente de produits vers la vente de services (*performance*) qu'un produit fournit (Stahel, 2010). Cela peut également être connu sous le nom de servitisation ou de servicisation (Stahel & Clift, 2016; Vandermerwe & Rada, 1988). La principale stratégie derrière la servitisation est le système produit-service, qui signifie que les producteurs conservent la propriété du produit et les consommateurs payent seulement pour le service qui est rendu (Baines et al., 2009). Ainsi, si le producteur conserve la propriété du produit, il souhaitera récupérer les matériaux utilisés pour produire le bien, afin d'éviter de s'en procurer de nouveaux, et de les réutiliser dans un autre processus de production. De plus, comme le producteur est l'unique propriétaire du produit, il sera également incité à augmenter autant que possible la durée de vie de ses produits afin d'éviter de nouveaux coûts de production. De cette manière, le produit aura davantage tendance à être conçu d'une façon à ce qu'il soit plus facile à réparer, à remettre à neuf voire à refabriquer. Vers la fin de vie du produit, il reviendra au producteur de réutiliser les différents composants du produit en fin de vie pour en fabriquer de nouveaux. En gardant cela à l'esprit, on remarque que l'économie de la performance intègre certains des principes du « berceau au berceau » au sens où, dans l'économie de la performance, l'objectif est de gérer le stock de ressources et non leur flux, comme cela se fait dans une approche berceau à berceau (Stahel & Clift, 2016).

Il existe différentes stratégies pour la mise en œuvre de l'économie de la performance, notamment l'économie du partage ou économie collaborative. Comme le producteur conserve la propriété des produits et que les consommateurs ne font que payer pour son utilisation, partager l'utilisation d'un seul bien entre de nombreux consommateurs différents et maximiser son utilisation devient l'une des stratégies de l'économie de la performance, comme par exemple, avec le partage de voitures ou de machines à laver. Cette stratégie exige cependant que les consommateurs s'impliquent dans le système, de sorte qu'ils prennent autant ou mieux soin des produits lorsqu'ils sont partagés, sinon cela pourrait avoir des conséquences indésirables. Pour cette raison, une excellente relation avec les consommateurs est un facteur clé du succès d'un système produit-service (Mont, 2001).

Ainsi, l'économie de la performance a influencé l'EC dans l'idée d'un changement complet du paradigme de la vente de produits à celui de la vente de services dans l'intention d'augmenter la performance environnementale et d'aider à atteindre la durabilité. Les nouveaux modèles commerciaux sont également l'un des principaux apports de l'économie de la performance à l'EC. L'économie de la performance exige de nouvelles manières de créer des entreprises (vendre des services plutôt que des biens), notion présente dans l'analyse de l'EC faite par certains chercheurs (Brennan & Tennant, 2013). En fait, 11 % des définitions d'EC examinées par (Kirchherr et al., 2017) mentionnent de nouveaux modèles commerciaux comme un principe clé que l'EC doit suivre.

3.1.2.4. Économie bleue

L'« économie bleue » est une approche née de la différenciation avec « l'économie rouge » et « l'économie verte ». Plus précisément, l'économie rouge représente l'économie linéaire. Dans ce cas, les entreprises tentent de réduire les coûts de production en mettant en œuvre une économie d'échelle, en visant une production de masse et, dans la plupart des cas, ils remplacent le travail humain par des machines. L'activité d'une économie linéaire est très intense en ressources et il n'y a pas d'intérêt particulier pour la protection de l'environnement ou la conservation des ressources. L'économie verte quant à elle est basée sur le déploiement de technologies renouvelables pour produire de l'énergie, avec l'objectif de réduire des émissions de carbone. Dans une économie verte, pour réduire les dommages environnementaux, des investissements de la part des entreprises pour innover et trouver des moyens de production moins polluants et plus efficaces dans l'utilisation de ressources sont nécessaires, ce qui tend à augmenter les prix de produits finaux pour les consommateurs. En outre, une économie verte ne traite pas l'ensemble du problème d'un point de vue systémique comme, par exemple le fait que la production de biocarburants qui requièrent l'utilisation de ressources primaires augmente par là-même certaines tensions sur l'utilisation de ces mêmes ressources à des fins alimentaires (Wautelet, 2018). En ce sens, l'économie bleue cherche à aller plus loin qu'une économie verte car elle envisage d'imiter le système naturel où il n'y a pas de production de déchets ni de pollution, et où tout est utilisé (Pauli, 2016). L'économie bleue tente de promouvoir de nouveaux modèles commerciaux et l'application d'idées innovantes en termes d'utilisation des matières résiduelles afin de réconcilier l'activité humaine avec l'environnement, tout en augmentant les emplois et en réduisant les coûts de production, améliorant de fait les performances économiques (Pauli, 2020). Ces nouveaux modèles commerciaux s'inspirent de la manière dont les écosystèmes fonctionnent en termes d'utilisation de chaque ressource pour couvrir les besoins de l'écosystème, et rien n'est gaspillé, créant ainsi une cascade de ressources qui sont utilisées d'un processus à l'autre.

À partir de cette description, l'EC a été influencée par l'économie bleue dans le sens où son concept implique l'application de nouveaux modèles commerciaux (comme dans le cas de l'économie de la performance) qui devraient impliquer la recherche de solutions permettant de réduire le gaspillage de ressources et améliorant les effets des activités humaines sur l'environnement, tout en atteignant de meilleurs indicateurs sociaux.

3.1.2.5. Biomimétisme

Le biomimétisme est une science qui promeut l'imitation du comportement, de la structure, du fonctionnement et de l'architecture de la nature afin de concevoir des produits et des systèmes de production qui mèneraient à la durabilité (Benyus, 2002). Le biomimétisme suit trois grands principes : la nature comme *modèle*, la nature comme *mesure* et la nature comme *mentor*. Avec ces principes, la science du biomimétisme postule que les activités humaines peuvent apprendre de la nature afin de concevoir des solutions durables, en suivant ses normes afin de résoudre les problèmes réels que la société présente et d'effacer le concept de déchets. Une autre idée que le biomimétisme promulgue est celle de la vision systémique, car il serait absurde de concevoir des produits respectueux de l'environnement qui seraient transportés par des véhicules polluants. Le biomimétisme en ce sens est également à la base de l'innovation et de nouveaux modèles économiques qui peuvent intégrer cette vision.

Ainsi, l'EC a pris du biomimétisme l'idée d'une vision systémique et d'innovations suivant l'architecture et l'ingénierie cachées dans la nature pour résoudre des problèmes économiques et de société.

3.1.2.6. Économie écologique et environnementale

L'économie écologique et l'économie de l'environnement sont des approches interdépendantes qui cherchent à comprendre les enjeux de la relation entre activité économique et environnement afin de réorienter le système économique vers plus de durabilité (Venkatachalam, 2007). D'une part, l'économie de l'environnement prend en compte l'environnement dans les fonctions économiques, en donnant plus de valeur aux ressources naturelles (considérées comme rares). L'idée selon laquelle les ressources naturelles ne sont pas illimitées est ainsi introduite (Norgaard, 1985). L'un des moyens d'intégrer l'environnement dans les fonctions économiques est de le monétiser, en trouvant le prix le plus juste pour les différentes externalités du système économique actuel. D'autre part, l'économie écologique souligne que, dans l'économie de l'environnement, l'écologie n'est pas bien représentée, car l'environnement est analysé d'un point de vue purement économique. Il est alors suggéré d'intégrer toutes les ressources environnementales et autres contraintes écologiques dans l'analyse économique (Inge, 2005). L'une des principales critiques de l'économie écologique envers l'économie environnementale est que cette dernière continue d'analyser l'économie comme un système ouvert à l'intérieur d'un système fermé. L'économie de l'environnement essaie d'intégrer les contraintes environnementales aux fonctions économiques, tandis que l'économie écologique raisonne en termes de système et la manière dont économie et environnement s'influencent mutuellement. Ces champs d'analyse économique ont évolué pour intégrer de nouvelles variables dans les différentes études. Toutefois, l'aspect social reste à la marge en tant que facteur qui influence les systèmes économie-environnement. Comme analysé par (Gendron, 2014), les différentes disciplines qui cherchent à concilier économie et environnement ne représentent que la crise environnementale de « l'élite », c'est-à-dire que n'est pris en compte que la vision des hommes d'affaires, ainsi que les agendas économiques et gouvernementaux, passant de cette manière à côté de l'intégration des objectifs de développement durable qui visent à répondre aux besoins humains actuels sans compromettre la capacité des générations futures à couvrir leurs propres besoins.

3.1.2.7. En bref

Si nous regardons les idées principales qui ont été utilisées pour construire le concept actuel d'EC, il est possible de convenir qu'elles ont des principes communs. Tout d'abord, toutes les propositions cherchent à concilier les activités humaines et l'environnement. Deuxièmement, elles encouragent le changement de paradigme consistant à appeler un bien ou une ressource non pas déchet mais plutôt ressource, ainsi, celle-ci pourra être utilisée en continu, ce qui impose alors des transformations dans la façon dont nous produisons et consommons. De plus, ces concepts partagent l'idée d'une vision systémique et considèrent comment chaque solution possible peut avoir un impact global sur l'ensemble du système, même si elles ne s'accordent pas sur l'extension du système, c'est-à-dire même s'il n'y a pas d'accord sur l'extension de l'application de l'EC. En ce qui concerne l'objectif principal de ces concepts, tous partagent l'objectif de croissance économique. Certains cherchent à obtenir également un développement durable. Ce dernier serait crucial pour le succès de l'EC car il intègre des variables sociales. D'ailleurs, (Baas, 2008) recommande que les différentes stratégies impliquent davantage d'acteurs, y compris les citoyens pour obtenir de plus grands progrès dans le domaine de la production plus propre et de l'écologie industrielle. Il devient plus difficile d'appliquer une nouvelle politique de protection de l'environnement si la société et les personnes qui la composent n'ont pas les connaissances suffisantes pour comprendre l'importance de telles politiques. Par exemple, si les individus ne coopèrent pas pour des tâches simples comme le tri et la classification des déchets, il est très difficile d'atteindre une bonne performance dans le recyclage des ressources (Knickmeyer, 2020). Ce manque de coopération pourrait venir du manque d'informations dont disposent les individus et du manque de confiance dans les stratégies politiques. De plus, si ces derniers ne disposent pas assez des ressources pour couvrir leurs besoins de base, ils ne seront pas disposés à coopérer avec des stratégies de protection de l'environnement, comme on l'a vu avec les émeutes des gilets jaunes en France. Par conséquent, la prise en compte des seules contraintes environnementales conduirait à l'échec de ces nouvelles stratégies et une focalisation sur le développement durable devrait être l'objectif principal de toute solution possible aux problèmes économiques actuels.

3.2. L'intégration de l'économie circulaire dans les politiques environnementales

En raison des solutions proposées aux enjeux environnementaux, notamment concernant la gestion des ressources et la réduction de la pollution, l'EC a de plus en plus été intégrée dans les politiques environnementales des divers gouvernements dans le monde. Mais avant que cela ne se traduise par des politiques et des lois dédiées, diverses initiatives et mesures s'inscrivant dans une démarche de circularité ont été établies dans les années 1970. Cette section vise à donner un aperçu de l'entrée des politiques associées à l'EC dans les politiques environnementales, et comment cela a motivé les gouvernements à travers le monde à appliquer des politiques plus ambitieuses en termes de protection de l'environnement trouvant dans l'EC une solution pouvant y contribuer.

3.2.1. Les premières politiques associées à la circularité

En Europe, les politiques relatives à l'EC ont commencé à émerger dans les années 1970, à travers diverses lois sur la gestion des déchets. Les premières ont été mises en œuvre pour la première fois en Allemagne en 1972 à travers l'Acte sur l'élimination des déchets qui cherchait à mieux contrôler les déchèteries pour prévenir la contamination du sol et de l'eau (Schnurer, 2002; Wautelet, 2018). Elle est remplacée par l'Acte de 1986 pour la gestion des déchets, qui visait quant à lui de mieux gérer les ressources à travers la réutilisation et le recyclage. D'autres pays européens intègrent aussi une démarche de gestion de déchets, en particulier le Portugal en 1987 et le Royaume-Uni en 1995 établissant des politiques favorisant une meilleure gestion des déchets à travers leur recyclage (Costa et al., 2010). Même si ces applications ne mentionnent pas directement l'EC ou le principe de cycle fermé, elles partagent l'idée qu'il n'est pas durable de continuer à utiliser la terre pour stocker les déchets car cela produit des dommages pour l'environnement et la santé humaine.

D'autres premières politiques envisagées dans un esprit d'EC dans le monde remontent à 1991, année où le Japon a approuvé la loi pour la promotion de l'usage de ressources recyclables, afin de réduire les déchets et de s'affranchir de leur incinération, qui causait des problèmes de santé à la population, et de garantir l'accès aux matières premières au secteur industriel (IES, 2015; METI, 2003). Les Pays-Bas quant à eux, à travers la réforme de 2002, promeuvent fortement le recyclage et ciblent un taux de recyclage des déchets industriels de 85 % et des déchets ménagers de 73 % (Commissariat Général au Développement Durable, 2014).

Des politiques plus étroitement liées à l'EC commencent à émerger vers la fin du vingtième siècle. En 1994, l'Allemagne passe l'Acte « Cycle fermé de substances », visant une meilleure gestion des déchets afin de réduire l'utilisation des terres pour la mise en décharge des déchets. Cette loi a également exigé des producteurs de repenser la conception de leurs produits, afin de faciliter la récupération des matériaux, la réutilisation des produits et la diminution de déchets (Geng et al., 2013; Ogunmakinde, 2019). Dans les années 2000, le Japon lance la loi sur l'usage efficace des ressources promouvant la réutilisation des matières et de l'énergie (Commissariat Général au Développement Durable, 2014). Cette loi est encadrée par « *The Basic Act for Establishing a Sound Material-Cycle Society* » qui vise la préservation des ressources naturelles et la réduction maximale de l'impact environnemental à travers principalement l'application des 3Rs (réduire, réutiliser et recycler) et l'utilisation des ressources en cascade (Ministry of the Environment Government of Japan (MEGJ), 2000). Ainsi, ces deux lois sont considérées comme pionnières en termes d'introduction des principes d'EC dans les politiques de gestion des ressources au niveau d'un pays.

En Chine, depuis les années 2002, l'EC est considéré comme une stratégie de développement et de limitation des impacts de la croissance économique sur l'environnement (Mcdowall et al., 2017; Yuan et al., 2006). Les premières initiatives de mise en place de politiques relatives à l'EC à l'échelle de l'Union européenne sont quant à elles apparues avec la Directive de 2008 sur les déchets qui cherche principalement à protéger l'environnement, la santé humaine et réduire les tensions sur les ressources, ainsi qu'à augmenter le recyclage (European Union, 2008; Smol et al., 2017) .

3.2.2. L'économie circulaire au cœur des politiques environnementales

La première mention de l'économie circulaire dans un texte législatif survient en 2008 en Chine avec « *la loi sur la promotion de l'EC* », à travers laquelle la promotion des 3R est visée, ainsi que le développement de la symbiose industrielle et des technologies propres (Commissariat Général au Développement Durable, 2014). Dans cette optique, la Chine adopte une approche descendante lors de l'application de l'EC car elle envisage le développement des parcs éco-industriels et des villes circulaires (Merli et al., 2018; Wautelet, 2018). Elle a également suivi une approche d'écologie industrielle car a été promue la mise en œuvre de la récupération de différentes ressources auprès d'industries à tous les niveaux, macro, micro et méso (Mcdowall et al., 2017). Il est important de dire aussi que la Chine est également le premier pays à établir des indicateurs d'économie circulaire à l'échelle macro-économique, que ce soit au niveau national ou provincial (Authier, 2016; Levy & Aurez, 2016).

À niveau européen, l'EC entre dans les stratégies de développement et de protection de l'environnement avec le *Plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire* de 2015, par lequel l'Europe cherche à « *boucler la boucle* » et ainsi donner un élan plus important à la mise en œuvre de l'EC dans tous les secteurs économiques (European Commission, 2015). Différentes stratégies sont développées afin d'accélérer la transition vers une économie circulaire, d'abord en stimulant les investissements dans des processus de production plus innovants qui permettent non seulement une meilleure gestion des ressources et des déchets, mais aussi la création de produits plus durables, ensuite, en impulsant une consommation plus responsable, et, finalement en favorisant une meilleure gestion des déchets permettant une récupération et un taux de recyclage plus importants. Par exemple, pour augmenter le taux de recyclage des matières plastiques, l'Union européenne a mis sur place une stratégie sur les matières plastiques (Commission Européenne, 2019). L'Europe a quant à elle montré qu'elle avait une approche ascendante lors de la conception des politiques ou actions relatives à l'EC (Merli et al., 2018), c'est-à-dire, qu'elle cherche à établir une culture de circularité dans la production de biens, visant ainsi une transformation du système, par exemple, à travers de la mise sur place de plateformes de partage de produits (Mcdowall et al., 2017; Wautelet, 2018).

En Allemagne, l'EC est mentionnée dans la législation du pays en 2012 avec l'Acte pour l'EC, établissant des stratégies visant à conserver les ressources naturelles et assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement au niveau de la production et de la gestion des déchets (Commissariat Général au Développement Durable, 2014). En France, l'EC rentre officiellement en 2015 dans la loi relative à la transition énergétique et la croissance verte, dans le but de réduire le gaspillage de ressources et de « *boucler la boucle* » concernant l'utilisation des matériaux. La loi reconnaît ainsi la transition vers une économie circulaire comme un objectif national et comme l'un des piliers du développement durable (section 2.2.4).

En outre, même si le Danemark a historiquement été l'un des premiers pays qui a concentré ses efforts vers une meilleure gestion des déchets et la valorisation des ressources à travers la mise en œuvre d'actions s'insérant dans une démarche d'EC, ce terme ne rentre dans la législation qu'en 2018, où le gouvernement adopte la stratégie pour l'EC (The Danish Government, 2018) destinée à déployer diverses initiatives d'EC comme une meilleure conception des produits pour la valorisation des matériaux, la

réduction des déchets incinérés afin d'augmenter les taux de recyclage. Au Royaume-Uni, les premiers pays à intégrer l'EC dans la loi sont l'Écosse et le Pays de Galles qui adoptent dès 2016 une stratégie vis-à-vis de l'EC par laquelle ils cherchent à retenir la valeur des matériaux aussi longtemps que possible (UK-Parliament, 2016). L'Angleterre quant à elle, ne commence qu'en 2018 le déploiement de l'EC à travers une stratégie holistique visant à établir des actions tant à niveau de la consommation que de la production. Parmi les principales actions, en ce qui concerne la consommation, ils cherchent à persuader les consommateurs à acquérir des produits plus durables et à favoriser la réutilisation et la remise à neuf des produits. S'agissant de la production, les actions cherchent à développer l'éco-design pour augmenter l'efficacité dans l'utilisation de ressources (DEFRA, 2020; UK-Government, 2018). Les Pays-Bas font partie des pays qui ont adopté une stratégie très engagée d'EC à travers un programme destiné à parvenir à une économie sans déchets en 2050. Dans ce programme, leur stratégie est basée sur l'augmentation de l'efficacité des ressources et sur promotion de la remise à neuf et la réparation des produits. Ils proposent également de revoir la conception des politiques pour faciliter l'accès à l'information, aux ressources financières, pour donner des incitations sur le marché, mais aussi favoriser l'inclusion d'un plus grand nombre de parties prenantes dans la prise de décisions (Government-of-the-Netherlands, 2016).

3.2.3. L'économie circulaire dans le reste du monde

En Amérique du Nord, la réglementation visant une meilleure gestion de déchets et la réduction de la pollution s'est concentrée autour d'initiatives de responsabilité élargie du producteur et sur le recyclage. Dans ce contexte, le déploiement de l'EC s'est focalisé sur les entreprises (Environment and Climate Change Canada, 2021). Plus précisément, aux États-Unis, l'EC n'a pas reçu la même attention de la part du gouvernement par comparaison avec l'Europe ou la Chine, son application s'étant principalement réalisée grâce à des initiatives d'entreprises et d'ONG qui ont mis en pratique différentes actions inscrites dans une logique d'EC (Circular Colab, 2018), sans forcément chercher à mettre en œuvre une EC en tant que telle mais plutôt par le biais d'initiatives isolées faisant écho à ce concept. Certaines sont issues de l'économie de la performance et visent notamment une meilleure conception des produits pour faciliter la récupération des matières, d'ailleurs plusieurs entreprises ont obtenu une certification berceau-berceau depuis 2005. Au Canada, le déploiement de l'EC suit une logique similaire à celle aux États-Unis et ce sont les entreprises qui mettent en pratique des initiatives d'EC, les réglementations qui permettraient son déploiement plus rapide faisant par ailleurs défaut (Cairns et al., 2018).

En Amérique du Sud, un retard important en termes de gestion des déchets demeure dans la plupart des pays, et même si l'EC a montré de nombreuses opportunités pour résoudre ce problème et améliorer d'autres défis économiques, sociaux et environnementaux, l'EC n'est pas une priorité dans l'agenda politique des gouvernements de cette région du monde (Margallo et al., 2019). Pour autant, certaines entreprises, considérant l'EC comme une opportunité d'améliorer leur performance économique, leur impact écologique et leur performance sociale, ont mis en œuvre différentes stratégies d'EC (Kowszyk & Maher, 2018), en particulier au niveau de la conception des produits et des systèmes, ainsi que de la récupération des ressources au niveau des communautés.

L'Afrique affiche une tendance similaire à celle des pays d'Amérique latine. Les gouvernements se concentrent sur la gestion des problèmes sociaux, la recherche de la croissance économique et sur la

récupération des ressources en matière de politique environnementale (Desmond & Asamba, 2019). En outre, les actions en faveur de l'EC appliquées dans ce continent n'ont pas été vraiment documentées ce qui ne permet pas de bien suivre leur évolution et leur impact. Cependant depuis quelques années avec la création de l'Alliance Africaine pour l'Economie Circulaire en 2016, les projets développés sont mieux suivis, la mise en œuvre dans la région est davantage soutenue (African Circular Economy Alliance, 2021).

3.3. La recherche scientifique sur l'économie circulaire

Cette section a pour objectif de donner un aperçu de l'évolution de la recherche scientifique autour du concept d'économie circulaire en ce qui concerne ses principes et caractéristiques, ses objectifs et sa définition. Pour cela, nous avons collecté et analysé diverses publications qui énoncent clairement « économie circulaire » dans ses mots clés.

3.3.1. Les débuts de la recherche scientifique sur l'économie circulaire

Malgré l'origine européenne du concept d'économie circulaire, l'intérêt scientifique pour l'étudier s'intensifie lorsque que la Chine adopte le concept d'EC comme une stratégie nationale pour passer vers une économie plus respectueuse de l'environnement et arriver à un développement durable (Q. Liu et al., 2009; Mcdowall et al., 2017). Ainsi, les premières études sont développées principalement par des auteurs Chinois¹³ et cherchent à mieux comprendre l'EC et comment elle est mise en œuvre dans le pays afin de pouvoir recommander des politiques publiques pour un meilleur déploiement. Elles montrent alors que les principes de la production plus propre et l'écologie industrielle ont fortement influencé la conception de l'EC et sa mise en œuvre (Yuan et al., 2006). En effet, les premiers projets d'EC en Chine visent le développement de parcs éco-industriels et d'éco-villes, afin d'avoir une gestion plus efficace des ressources et de réduire la production des déchets. Plus tard, d'autres initiatives d'EC ont été développés dans le territoire à des niveaux micro, méso et macro (B. Su et al., 2013). Au niveau micro, les initiatives d'économie circulaire encouragent des actions dans le secteur de la production en vue d'une meilleure gestion des ressources et dans celui de la demande pour motiver une consommation plus responsable. Au niveau micro, les actions se concentrent sur la mise en place d'une symbiose industrielle et au niveau macro, une coopération entre industries des différents territoires est recherchée.

Malgré les progrès sur le développement de l'EC dans le pays, la recherche en Chine reste dispersée, limitant un progrès uniforme dans le pays (Heshmati, 2015). Cela s'observe notamment au niveau des différentes méthodes proposées pour mesurer la circularité des projets développés dans le pays. Au niveau international, une telle dispersion s'observe aussi, comme en Europe où l'EC est d'abord mise en œuvre comme une stratégie de gestion de déchets alors qu'en Chine elle est plutôt développée pour créer des projets d'écologie industrielle cherchant à augmenter la compétitivité du secteur. Ainsi, les premiers déploiements de l'EC sont menés de manière différenciée en raison de l'absence d'une véritable définition de ce concept. Chaque acteur l'applique ainsi suivant sa propre conception (Preston, 2012). La

¹³ Durant cette première période, d'autres chercheurs dans le monde s'intéressent aussi à l'étude de l'EC, cependant leur recherche est développée, dans la plupart de cas, en association avec des centres de recherche chinois et étudient également le déploiement de l'EC dans ce pays.

convergence vers une définition de l'EC est de fait difficile, les nombreuses disciplines ayant influencé la construction du concept d'EC (Masi et al., 2017) pouvant diverger son interprétation (Rizos et al., 2017). La principale divergence porte sur l'objectif même de l'EC, certains considérant que l'EC vise une meilleure gestion des ressources, tandis que d'autres l'envisagent comme une transformation complète du système économique. La vision commune néanmoins partagée sur ce que représente l'EC réside dans le fait que ce le système économique actuel n'est pas durable et que l'économie et l'environnement évolue dans un même écosystème devant être pris en compte pour trouver une solution globale (Wautelet, 2018). Pour cela, une refonte des systèmes de production et de consommation s'avère nécessaire, en maximisant la vie utile des ressources et en réduisant la contamination.

La recherche sur l'EC prend beaucoup plus d'ampleur après les travaux développés par la FEM en 2013 (Ellen MacArthur Foundation, 2013b, 2013a) et le plan d'action en faveur de l'EC adopté par la Commission européenne en 2015 (European Commission, 2015). En particulier, les travaux de la FEM ont eu un impact important sur la communauté scientifique car ils proposent une définition et en spécifient les principes qui sont aujourd'hui largement acceptés (Kirchherr et al., 2017). A partir de ce moment, les discussions autour de l'EC augmentent significativement. Dans la section suivante, nous détaillons la portée de ces discussions.

3.3.2. Discussions autour du concept d'économie circulaire

3.3.2.1. Les objectifs de l'économie circulaire

Dans un premier temps, les discussions autour de l'EC portent sur le fait que les premières actions mises en œuvre dans cette perspective visent principalement à « fermer la boucle » - autrement uniquement se concentrer sur la gestion des déchets, c'est-à-dire utiliser les déchets comme ressources d'un autre processus par exemple principalement à travers le recyclage et des initiatives d'écologie industrielle – au lieu de chercher également à « ralentir la boucle », à travers une augmentation de la durée de vie et d'utilisation des produits, permettant à l'EC de se placer dans une approche plus globale de réduction de la consommation des ressources (Ghisellini et al., 2016; Merli et al., 2018). En effet, si on se concentre sur les premiers déploiements de l'EC, ceux-ci encouragent principalement l'application des 3R (Heshmati, 2015), et en particulier l'application du recyclage. Les stratégies suivies par plusieurs pays en matière d'EC sont établies dans cette perspective et négligent largement la réduction de l'utilisation des ressources. Plus précisément, les critiques formulées sont alors que si les stratégies d'économie circulaire se concentrent principalement sur le développement d'une industrie du recyclage, cela ne motivera pas forcément une réduction des déchets, dans la mesure où elle pourrait encourager à produire au moins la même quantité et continuer avec un fonctionnement en continu de l'industrie du recyclage (Lemille, 2019). En outre, se centrer principalement sur le recyclage ne permet pas de fermer complètement la boucle en raison des pertes de ressources dans les différents processus de transformation.

Le manque d'attention portée à la réduction de la consommation dans une perspective d'EC s'explique d'abord par le fait que la réduction de la consommation est associée à une faible performance économique puis car l'EC est associée dans ses origines à une stratégie de gestion de déchets. Ainsi, pour mettre en œuvre des initiatives d'EC plus efficaces et complètes, il sera nécessaire d'établir des stratégies

claires, à travers une normalisation sur l'utilisation et l'application de chaque « R » qui optimiserait ainsi l'utilisation des ressources et maximiserait leur valeur tout au long du cycle de production et de consommation (Winans et al., 2017). Cela doit être suivi par des évaluations de performance qui permettraient d'améliorer le cas échéant la performance de l'application des « R ».

D'autres mesures davantage explorées dans la mise en œuvre d'une EC sont celles liées à une production plus propre, visant à réduire l'impact environnemental de la production et à optimiser les performances et l'efficacité des processus (Merli et al., 2018; Tomić & Schneider, 2018). Ainsi, l'EC ne viserait pas à atteindre une croissance économique plus forte, car une consommation plus importante impliquerait une production elle-aussi plus importante, pouvant surcompenser l'efficacité plus élevée de la production et conduire à des effets rebond, ne répondant ainsi pas aux défis à relever tels que l'épuisement des ressources (qui est considéré comme un des principes clés de l'EC) (Korhonen et al., 2018). Ainsi, mettre l'accent sur une croissance économique continue ne permettrait pas de s'attaquer aux enjeux environnementaux actuels, car cela ne remettrait pas en cause le système économique et conduirait à l'élaboration d'instruments politiques inefficaces pour sortir du consumérisme (Hobson, 2019). De plus, penser qu'une économie en boucle fermée conduirait à une croissance économique constante ne semble pas très réaliste car, à un moment donné, le coût supplémentaire de l'amélioration du flux circulaire de matières dépasserait les avantages pour la société. Cela s'applique à tout type de protection de l'environnement (Ekins et al., 2019). Par conséquent, certains chercheurs recommandent qu'une EC vise une économie à l'état stationnaire (Ghisellini et al., 2016). Cela contraste avec d'autres études qui trouvent dans l'EC un moyen d'avoir une croissance économique écologiquement soutenable (Sauvé, Normandin, et al., 2016). En effet, si l'EC s'est démarquée des autres concepts¹⁴ qui cherchent à concilier économie et environnement c'est parce qu'elle s'insère « aisément dans les habits de l'économie » (Bourdin & Maillefert, 2020), c'est-à-dire qu'elle permet de continuer avec cette logique de croissance économique infinie. Ainsi, cela apparaît être une des principales raisons pour laquelle l'EC a attiré particulièrement l'attention des gouvernements et des entreprises, comme une stratégie à suivre pour réduire les impacts environnementaux causés par l'activité économique (Merli et al., 2018). Cet objectif de croissance économique est présent dans les stratégies d'adoption d'une EC adoptés par les différents pays européens ainsi que dans la plupart des définitions d'EC proposées dans les travaux académiques (Kirchherr et al., 2017). Ces derniers examinent 114 définitions d'EC et en déduisent les objectifs poursuivis (Kirchherr et al., 2017). L'objectif le plus mentionné est la recherche d'une croissance économique (46 % des définitions mentionnent cet objectif).

L'EC est ainsi davantage perçue comme un moyen de prendre en compte l'environnement sans affecter la croissance économique. Pour y parvenir, des solutions permettant la transformation du consumérisme quotidien devront être mises sur place, à travers des *business models* innovants (Hobson, 2019). Pour autant, la façon d'intégrer l'EC et ses principes dans des *business models* n'a pas été étudiée de manière approfondie (Lewandowski, 2016). (Lieder & Rashid, 2016) critiquent que la non inclusion de perspectives de *business models* pourrait entraver la mise en œuvre de l'EC car les avantages pour chacune des parties prenantes ne seraient pas explicites. Dans cette perspective de *business models*, (Lahti et al., 2018)

¹⁴ Principalement du concept de développement durable lequel aborde plusieurs sujets et se montre moins appliquée à la création de valeur économique.

constate qu'il y a d'énormes incertitudes lors d'une transition des entreprises vers une EC, en particulier au niveau des relations à développer avec les clients et des attributs que les nouveaux produits devront inclure, par exemple, lors d'une application de servitisation. Ils constatent également qu'il n'y a pas de transparence en ce qui concerne la création de valeurs dans ce nouveau type de *business models* qui favoriserait alors un changement par rapport à un modèle linéaire, présentant ainsi des incertitudes plus marquées.

Enfin, les recherches sur l'EC se sont focalisées sur le traitement des problèmes environnementaux, notamment la récupération des matériaux, la gestion des déchets et la réduction des émissions, et sur l'objectif de surmonter des défis économiques (Geissdoerfer et al., 2017) mais ont largement négligé les questions sociales¹⁵, qui devraient être étudiées avec beaucoup plus d'attention (Sauvé, Bernard, et al., 2016). Ce manque de considération pour ces questions peut s'expliquer par le fait que l'EC se positionne principalement dans un contexte industriel, notamment à travers l'application des principes d'écologie industrielle, de symbiose industrielle ou de métabolisme industriel (D'Amato et al., 2017). Lorsque des aspects sociaux sont considérés dans les études d'EC, il s'agit principalement de créations d'emplois car il n'y a pas de compréhension claire sur la façon dont l'EC peut y contribuer (Ekins et al., 2019; Geissdoerfer et al., 2017; Wijkman & Skanberg, 2014). L'ADEME considère notamment que l'EC peut contribuer au bien-être des individus notamment à travers la création d'emplois (ADEME, 2014). Une solution pour inclure d'autres aspects sociaux dans la mise en œuvre de l'EC est l'éducation et la participation citoyenne. Par l'éducation en EC, les citoyens pourraient être sensibilisés sur l'impact de leurs actions quotidiennes sur l'environnement et sur la manière de contribuer à la préservation des ressources et à la protection de l'environnement, à travers des comportements de consommation plus durables (Suárez-Eiroa et al., 2019). Ce point est d'autant plus important que le succès de l'EC dépend du changement de paradigme de la production mais aussi des comportements de consommation, ce qui nécessite des acteurs mieux informés et impliqués dans la transformation du système (Bonciu, 2014). Ainsi, l'intégration des aspects humains aux *business models* d'EC serait essentielle pour parvenir à une société plus durable (Chiappetta Jabbour et al., 2019; Schögl et al., 2020) car les consommateurs, en demandant des produits et services plus respectueux de l'environnement, pousseraient aussi la transformation du système. Les autres notions sociales que l'EC devrait inclure portent sur les dimensions législative, institutionnelle et culturelle (Homrich et al., 2018). Il s'agit alors de mettre en place des réglementations transparentes qui favorisent la transition du système et des institutions solides qui contribuent la consolidation de ce nouveau système ainsi que l'implication de toute la société. La dimension législative fait aussi référence à la dimension politique qui est un aspect fondamental pour permettre le déploiement de l'EC (Ekins et al., 2019).

Dans un contexte d'EC, il est proposé de ne pas se concentrer seulement sur l'analyse des avantages économiques et l'augmentation de l'efficacité des systèmes mais de plutôt étudier l'EC du point de vue de la durabilité (Türkeli et al., 2018). De même, (Murray et al., 2017) concluent que l'EC peut contribuer au développement durable s'il inclut les questions sociales dans son analyse, sinon, avec des objectifs mal définis, l'EC pourrait donner des résultats trompeurs. Dans ce sens, l'EC est perçue comme un paradigme plus opérationnel que le concept de développement durable, lequel est considéré comme très diversifié

¹⁵ Les aspects sociaux incluent par exemple la diversité culturelle, la durabilité institutionnelle, la justice sociale, la participation citoyenne, la qualité de vie.

qui manque de moyens mise en œuvre plus opérationnels (Geissdoerfer et al., 2017). L'EC doit donc trouver des moyens pour financer ses projets, avoir des données facilement accessibles qui permettent une prise de décisions plus informées, motiver l'utilisation des technologies de l'information qui facilitent les analyses des initiatives en faveur d'une EC et créer des relations plus étroites avec les différentes parties prenantes si elle veut s'imposer comme une discipline plus opérationnelle (Fan et al., 2019).

Ainsi, au regard de toutes ces discussions, la croissance économique devrait être conservée comme un objectif clé de l'EC, du moins dans un premier temps, car actuellement c'est seulement à travers la croissance économique que la société mesure la performance de son économie. Cette croissance pourrait apporter les moyens financiers nécessaires pour établir les bases de la transformation du système et permettre ainsi de poursuivre la recherche d'autres solutions de développement. Dans cette optique, il convient d'envisager comment les ressources générées à travers une EC pourraient être redistribuées vers d'autres initiatives en faveur d'un développement durable (Korhonen et al., 2018). Quant à la préservation de l'environnement, l'EC l'envisage à travers une meilleure gestion des ressources tant au niveau de la production que de la consommation. Dans cette perspective, elle cherche à ne pas produire de déchets ni de pollution ; les ressources dans ce cas doivent être soit réutilisées, soit réintégrées dans la nature comme nutriments. Un point de convergence entre les chercheurs réside dans l'idée que le but ultime de l'EC doit être de contribuer au développement durable (Geissdoerfer et al., 2017; Heshmati, 2015). (Schroeder et al., 2019) concluent d'ailleurs que la mise en œuvre de l'EC peut contribuer directement à 21 des objectifs de développement durable fixés par les Nations Unies et peut indirectement aider à en atteindre 28 supplémentaires. Certains auteurs voient l'EC comme une condition pour atteindre la durabilité.

3.3.2.2. Principes

Comme mentionné dans la section 3.1.1, le concept d'EC émane de plusieurs disciplines, ce qui n'a pas permis d'aboutir à un consensus quant à son objectif, ses principes et sa définition. Dans cette section, nous condons ce qui a été établi dans la littérature concernant les principes de l'EC.

Les premières publications sur le concept d'EC considèrent comme principes principaux les 3 R, autrement dit « Réduire, Réutiliser et Recycler » (B. Su et al., 2013; Yong, 2007; Yuan et al., 2006). D'autres auteurs ont ajouté un 4^e R avec le principe de « Récupérer » (Reh, 2013), principalement en raison du fait que les lois relatives à l'EC proposées en 2002 par la Chine promouvaient notamment ces activités de récupération et que la plupart des publications avant 2013 proviennent principalement d'auteurs chinois (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017). Le principe de réduction fait référence à la diminution de l'utilisation des matériaux dans la consommation et la production, le principe de réutilisation implique de donner une autre vie à un bien ou un matériau qui, dans l'économie actuelle, serait jeté dans les décharges. Une idée évoquée précédemment qui peut être associée au principe de réduction consiste à « *ralentir la courbe* » (Bocken, Ritala, et al., 2017). *Ralentir la courbe* signifie réduire la vitesse à laquelle les ressources primaires sont réintroduites dans le cycle de production, en conservant dans le temps au maximum la valeur qu'ont les produits. Cette idée a été négligée dans la littérature car, d'un point de vue commercial, le ralentissement du cercle est principalement associé à la vente de moins de produits, ce qui est considéré comme une réduction des profits. L'idée de ralentir le cercle va de pair avec de nouvelles

pratiques commerciales telles que les modèles de système produit-service et d'autres pratiques qui, grâce à la remise à neuf, prolongent le cycle de vie des produits. Le principe de recyclage essaie de traiter les matériaux (qui autrement seraient jetés et qui ne peuvent pas entrer dans l'action des principes précédents) afin de produire une autre unité d'elle-même avec des propriétés identiques ou inférieures. Il est également lié à l'idée de fermer la boucle (Bocken, Ritala, et al., 2017), ce qui signifie que la valeur doit être préservée tout au long de la chaîne de production et de consommation. Enfin, le principe de récupération fait référence à l'utilisation de produits, qui autrement seraient jetés, comme intrants pour produire de l'énergie. Si ce n'est pas possible de les utiliser de nouveau dans la chaîne de production, il faut les intégrer dans la nature de façon à être absorbés et utilisés comme nutriments. Dans cette optique, les produits doivent être conçus en utilisant des ressources qui pourraient être facilement absorbées par la nature et de sorte que tous les matériaux puissent être récupérés, vers la fin de sa vie, ce qui appelle fortement à l'innovation. D'autres auteurs ont inclus d'autres « R » aux principes d'EC, tels que *refuser, réparer, la remise à neuf, refabriquer* ou encore *réutiliser* (Korhonen et al., 2018; van Buren et al., 2016). Certains auteurs soutiennent que ces derniers principes peuvent être couverts par les 4 principes initiaux. Par exemple, refuser, ce qui signifie empêcher l'utilisation des ressources, peut être inclus dans le principe de *réduction*. Quant à la réparation, la remise à neuf, le reconditionnement et la réutilisation, ils peuvent être inclus dans le principe de récupération (Anastasiades et al., 2020).

Depuis 2013, la FEM propose divers nouveaux principes pour l'EC¹⁶. Ces principes complètent ceux des 4 R, d'abord parce qu'ils créent un lien entre eux, en réfléchissant d'un point de vue de système ; ils motivent l'utilisation des sources renouvelables et la préservation de la nature et de la biodiversité ; enfin, ils incitent à la mise en place de nouveaux mécanismes de production qui permettent l'application des R. Selon (Homrich et al., 2018), les principes édictés par la FEM ont davantage été utilisés par les entreprises. Les 4 R ont été constamment utilisés par la plupart des revues de littérature comme (Anastasiades et al., 2020; Z. Liu et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018). En fait, (Kirchherr et al., 2017), après leur examen des 114 définitions du concept d'EC, identifient les principes fondamentaux utilisés par ces définitions, incluant les 4 R. D'autres principes identifiés dans cette revue sont la hiérarchie des déchets et l'approche systémique, principe qui a été utilisé par 42 % des définitions examinées. L'approche systémique comprend trois niveaux différents pour l'application de l'EC, les niveaux micro, méso et macro. Le niveau micro fait référence aux consommateurs et aux entreprises ; le niveau méso aux régions et aux parcs éco-industriels ; tandis que le niveau macro correspond à l'échelle nationale et mondiale. Certains auteurs affirment que cette désagrégation des niveaux néglige un lien important, le niveau de la chaîne d'approvisionnement, correspondant à l'intersection entre les niveaux micro, méso et macro (Masi et al., 2017; Merli et al., 2018). De cette manière, le niveau de la chaîne d'approvisionnement devrait avoir sa

¹⁶ En 2013, (Ellen MacArthur Foundation, 2013b, 2013a) a proposé les principes suivants : Concevoir les déchets ; Construire la résilience grâce à la diversité, Compter sur les énergies renouvelables , Penser en termes de systèmes, les déchets qui sont de la nourriture, penser en cascades. En 2016, de nouveaux principes ont été proposés (EMF, 2016) : Préserver et valoriser le capital naturel en contrôlant les stocks finis et en équilibrant les flux de ressources renouvelables ; Optimiser les rendements des ressources en faisant circuler les produits, les composants et les matériaux à la plus grande utilité à tout moment dans les cycles techniques et biologiques ; Favoriser l'efficacité du système en révélant et en concevant les externalités négatives.

En 2019, une mise à jour de ces principes est présentée (EMF, 2019) : Designer les déchets et la pollution ; Garder les produits et matériaux en service ; Régénérer les systèmes naturels.

place en tant que principe de l'économie circulaire, car il est nécessaire de penser en termes de systèmes et de coordonner son déploiement sous toutes les perspectives différentes.

D'autres auteurs ont discuté du principe de hiérarchie des déchets et soulignent que si elle n'est pas analysée de façon holistique autour la création de valeur des ressources ou des produits tout au long de la chaîne d'approvisionnement, des conséquences indésirables peuvent survenir, en particulier si la création de valeur est simplement analysée à partir d'un point de vue environnemental (Iacovidou et al., 2017). Il est donné à titre d'exemple que la co-combustion du charbon avec de la biomasse implique la réduction du rendement des chaudières et produit comme déchet un type de cendre inadapté à d'autres types d'applications. Un autre exemple cité est celui de l'UE où environ 46 % du plastique post-consommé a été exporté vers l'est où il a été traité dans des installations de faible qualité produisant des émissions dangereuses, avec des travailleurs mal payés, donnant par conséquent des externalités qui auraient pu être évitées si une analyse et une application optimale et holistique de l'EC tout au long de la chaîne d'approvisionnement avaient été effectuées.

(Kalmykova et al., 2018) ont identifié d'autres principes que l'EC doit prendre en compte et que nous avons cités précédemment, l'éco-efficience (minimiser les ressources et les polluants d'un système) et l'éco-efficacité (la production des biens et leurs activités associées doivent être conformes au système environnemental). (Masi et al., 2017) dans leur revue soulignent pour leur part quatre principes fondamentaux de l'EC. D'abord, l'EC doit suivre un approche régénératrice et réparatrice, ensuite elle doit dissocier la croissance économique de la dégradation de l'environnement et doit chercher à préserver la valeur économique, sociale et environnementale, et contribuer à la résilience du système. Les principes opérationnels qui contribueraient à une meilleure application de l'EC. Proposés par (Suárez-Eiroa et al., 2019) incluent l'ajustement des entrées du système aux taux de régénération, l'ajustement des sorties du système aux taux d'absorption, la fermeture du système, le maintien de la valeur des ressources dans le système, la réduction de la taille du système, la conception de l'économie circulaire, l'éducation à l'économie circulaire. On peut soutenir que la plupart de ces principes peuvent être inclus dans les principes détaillés précédents (les 4 R), mais ce qu'il est important de relever est que l'aspect social de l'EC doit être pris en compte car cette transformation ou transition vers une économie circulaire est basée autant sur l'innovation que sur la volonté de la société à soutenir et mettre en œuvre ces idées. Avec la préservation de la valeur économique, sociale et environnementale, et l'éducation à l'EC, les auteurs essaient de souligner que l'EC est un changement complet de paradigme à tous les points de vue de la société, et que sans changement de comportement des clients et des individus plus largement, la plupart des principes d'EC seront très difficiles à respecter. En fait, (Elia et al., 2017) soulignent que les stratégies d'écoconception pour le développement de produits ne peuvent être réalisées sans un changement de comportement du client. De même, (Anastasiades et al., 2020) ont identifié qu'un changement de comportement de l'utilisateur serait nécessaire pour fermer la boucle. (Esmailian et al., 2018) font quelques remarques sur le fait que l'interaction des personnes est nécessaire même pour accomplir les concepts de base de la récupération et du recyclage, car les ménages doivent être prêts à pré-trier les déchets avant de disposer des ressources dans des conteneurs spécifiques.

À partir de cette revue de principes, nous proposons notre vision de ceux qui devraient être appliqués afin d'avoir un meilleur déploiement d'une stratégie d'EC. Premièrement, comme la plupart des publications

d'EC le reconnaissent, les 4 R (réduire, réutiliser, recycler et récupérer) font partie des principes fondamentaux d'EC. Ces principes englobent la plupart des philosophies promulguées par l'idée d'EC en termes de diminution de l'utilisation des ressources, d'allongement de la durée de vie des produits et des ressources, de fermer la boucle grâce au recyclage. Ensuite, nous retenons le principe de l'approche système qui inclut les niveaux micro, méso, macro et celui de la chaîne d'approvisionnement qui permet l'analyse des effets possibles de l'application de l'EC à l'ensemble du système. De plus, le principe de redesigner est proposé. Ce principe fait référence à la nécessité de changer la façon dont l'économie produit, pour faire durer les biens plus longtemps et pour faciliter le recyclage ou la récupération de ses composants, en évitant ainsi la production de déchets indésirables ou tout type d'émissions qui nuirait à l'environnement et / ou à la santé des personnes. (Haupt et al., 2017) discutent de la façon dont une conception spécifique de produits permet une meilleure ou une pire performance dans le processus de recyclage. Ils font également référence au fait qu'il faut changer la façon dont les personnes sont prises en compte dans le système économique, non seulement en tant qu'unité de travail, mais aussi en tant que paramètre pouvant modifier le fonctionnement de l'économie, en transformant de cette façon tous les aspects de la société pour une meilleure et plus efficace application d'une EC.

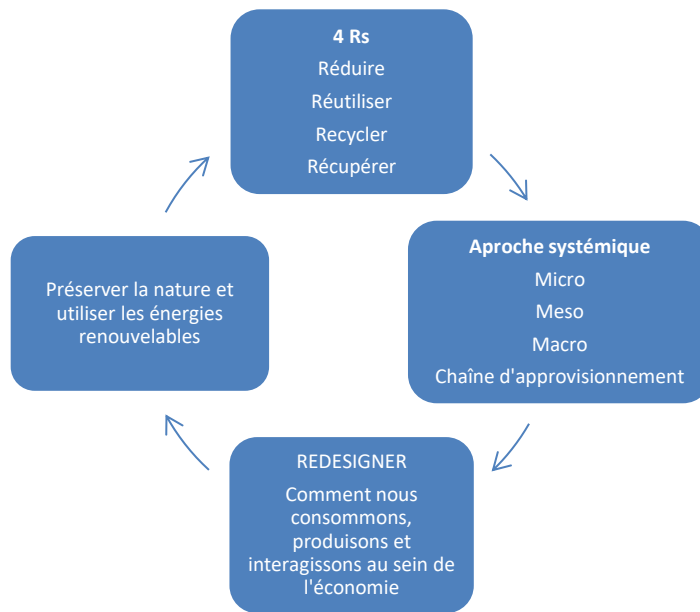


Figure 2 : Principes proposés pour l'EC

De cette façon, l'EC apparaît comme une stratégie prometteuse car elle a attiré l'attention des entreprises, des académiques et des décideurs politiques, et fait remarquer que toutes les ressources avaient de la valeur qu'il fallait tenter de conserver tout au long du cycle de production (Korhonen et al., 2018). Aussi, l'EC cherche à réduire les effets indésirables des activités économiques sur l'environnement, en promouvant une croissance économique, ce qui la démarque des autres disciplines environnementales. Pour autant, le chemin est encore long à parcourir pour bien découvrir le potentiel d'EC qui reste encore largement inexploré (Marrucci et al., 2019; Ruiz-Real et al., 2018). Ainsi, la recherche doit continuer en trouvant d'abord un consensus de ce qu'est l'EC, ce qui s'avère une tâche compliquée car sa compréhension continue à diverger plutôt que converger (Homrich et al., 2018). En outre, en plus

d'identifier comment les concepts qui ont servi de base à sa création ont influencé sa compréhension actuelle, il faut comprendre comment les disciplines comme l'ingénierie et les sciences sociales influencent son évolution. Il faudra aussi bien identifier ses limites d'application, afin de prévenir de possibles effets rebond, et pouvoir définir des stratégies inter et intra organisationnelles plus efficaces en faveur d'un développement durable.

3.3.3. Proposition de définition de l'économie circulaire

Comme indiqué précédemment, le concept d'EC a été associé à de nombreuses disciplines, principes et objectifs, conduisant à plusieurs tentatives de la définir. Parmi ces définitions, il est important de mettre en avant celle proposée par la FEM (Ellen MacArthur Foundation, 2013a) car elle a beaucoup influencé la communauté et a été utilisée par plusieurs chercheurs pour délimiter leur compréhension de l'EC. Cette définition précise ainsi qu'une économie circulaire « *est un système industriel réparateur ou régénérateur par intention et par conception. Il remplace le concept de "fin de vie" par la restauration, s'oriente vers l'utilisation d'énergies renouvelables, élimine l'utilisation de produits chimiques toxiques, qui nuisent à la réutilisation, et vise l'élimination des déchets grâce à une conception supérieure des matériaux, produits, systèmes, et, dans ce cadre, des modèles économiques* ». De cette façon, cette définition concentre le champ d'application de l'EC en amont, c'est-à-dire du côté de la production, suivant principalement des idées d'écologie industrielle.

(Kirchherr et al., 2017) ont pour leur part passé en revue 114 définitions, que nous avons discuté au cours de la section 3.3.2, et ont proposé leur propre définition qui précise ainsi qu'une économie circulaire « *décrit un système économique basé sur des modèles économiques qui remplacent le concept de « fin de vie » par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la valorisation des matériaux dans les processus de production/distribution et de consommation, fonctionnant ainsi au niveau micro (produits, entreprises, consommateurs), niveau méso (parcs éco-industriels) et niveau macro (ville, région, nation et au-delà), dans le but de réaliser un développement durable, ce qui implique la création de qualité environnementale, de prospérité économique et d'équité sociale, au bénéfice des générations actuelles et futures* ». Ils définissent l'économie circulaire du point de vue du système économique, prenant en compte à la fois la production et la consommation, dans l'objectif ici de contribuer au développement durable. Ils identifient également les *business models* et les consommateurs comme des facilitateurs de l'EC mais ils omettent la politique publique. En effet, la dimension politique s'avère extrêmement importante car il n'est pas clair de voir comment passer à une EC sans la mise en place d'une politique publique soutenue et déterminée (Ekins et al., 2019).

Nous avons identifié d'autres définitions qui ont été proposées ces dernières années (Tableau 8Tableau 9), dans l'esprit de contribuer à un consensus sur l'EC, d'autres chercheurs ayant proposé leur propre définition. (Korhonen et al., 2018) et (Prieto-Sandoval et al., 2018) confirment dans la leur l'objectif final de l'EC, à savoir contribuer au développement durable, et soulignent également l'influence importante que le secteur de la consommation joue dans le déploiement de l'EC. Ils mentionnent en particulier que l'EC doit considérer un changement au niveau de la société (pas seulement du secteur de la production comme c'est le cas dans les définitions précédentes) qui permette une interaction plus responsable avec l'environnement. (Prieto-Sandoval et al., 2018) remarquent l'importance des innovations au moment de

légiférer pour permettre un déploiement soutenu de l'EC. La FEM (EMF, 2019) propose une nouvelle définition d'EC (Tableau 8Tableau 9) et souligne alors que l'EC est un système qui bénéficie aux secteur privé, à la société et à l'environnement. Elle souligne en particulier qu'il est nécessaire d'avoir une collaboration entre les citoyens, les entreprises et les gouvernements.

D'autres définitions cherchent plutôt à délimiter l'EC au secteur de la production, son objectif serait alors principalement de limiter les impacts négatifs des activités productrices par le biais d'une meilleure utilisation des ressources et la prévention de la production de déchets. C'est le cas des définitions de (Ekins et al., 2019) ou (Homrich et al., 2018) par exemple. Cependant, donner une telle définition limite les potentiels effectifs que l'EC peut offrir, car nous avons pu constater tout au long de cette revue qu'une grande partie des actions devaient aussi se développer au niveau de la consommation et que ne considérer que la production limitait largement le potentiel de déploiement d'une économie circulaire. Il faut en effet pouvoir compter sur la volonté des consommateurs pour augmenter l'efficacité des différentes stratégies, soit pour la réduction de la consommation des ressources soit pour augmenter les taux de recyclage, ce sont les consommateurs finaux qui, à travers leur actions, permettront le succès des stratégies de mise en œuvre de l'EC.

Tableau 8 : Définitions de l'économie circulaire

Définitions d'EC	
(ADEME, 2014)	Système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien-être des individus
France 2015	La transition vers une économie circulaire vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets.
EU 2015	Circular economy, where the value of products, materials and resources is maintained in the economy for as long as possible, and the generation of waste minimized
(Korhonen et al., 2018)	Circular economy is an economy constructed from societal production-consumption systems that maximizes the service produced from the linear nature-society-nature material and energy throughput flow. This is done by using cyclical materials flows, renewable energy sources and cascading-type energy flows. Successful circular economy contributes to all the three dimensions of sustainable development. Circular economy limits the throughput flow to a level that nature tolerates and utilizes ecosystem cycles in economic cycles by respecting their natural reproduction rates
(Prieto-Sandoval et al., 2018)	The circular economy is an economic system that represents a change of paradigm in the way that human society is interrelated with nature and aims to prevent the depletion of resources, close energy and materials loops, and facilitate sustainable development through its implementation at the micro (enterprises and consumers), meso (economic agents integrated in symbiosis) and macro (city, regions and governments) levels. Attaining this circular model requires cyclical and regenerative environmental innovations in the way society legislates, produces and consumes
(Homrich et al., 2018)	CE is a strategy that emerges to oppose the traditional open-ended system, aiming to face the challenge of resource scarcity and waste disposal in a win-win approach with economic and value perspective.
(Fan et al., 2019)	The circular economy is a system developed by minimizing the use of energy, natural resources and waste generation the paradigm of the circular economy includes minimizing inputs of raw materials and outputs of waste, keep resources value within the system as long as possible and reintegrating products into the system when reaching the end of life
(EMF, 2019)	The circular economy is a systems-level approach to economic development designed to benefit businesses, society, and the environment. A circular economy aims to decouple economic growth from the consumption of finite resources and build economic, natural, and social capital. Underpinned by a transition towards renewable energy sources and increasing use of renewable materials, the concept recognizes the importance of the economy working effectively at all scales. This means it features active participation and collaboration between businesses both small and large, and from countries and cities to local communities and the people within them. Such a distributed, diverse, and inclusive economy will be better placed to create and share the benefits of a circular economy
(Chiappetta Jabbour et al., 2019)	It is predominantly understood as using post-consumption products, resources, and packaging to create new value through the exchange of linear flows of energy and materials for closed-loop systems of production and consumption
(Suárez-Eiroa et al., 2019)	Circular economy is a regenerative production consumption system that aims to maintain extraction rates of resources and generation rates of wastes and emissions under suitable values for planetary boundaries, through closing the system, reducing its size and maintaining the resource's value as long as possible within the system, mainly leaning on design and education, and with capacity to be implemented at any scale
(Sassanelli et al., 2019)	CE can be defined as an industrial system that is restorative or regenerative. Its intention is to close the loop of the linear product lifecycle, substituting the end-of-life concept with restoration. This can be achieved through a superior design of the system to be delivered and of the related Business Model (BM), with the aim of removing wastes and retaining as much value as possible from the products and materials involved, also fostering the use of renewable energies and the elimination of toxic chemicals.
(Rosa et al., 2019)	CE is defined as a global economic model minimizing the negative effects of finite resources consumption, by focusing on intelligent design of materials, products and systems. Inspired by the concept of closed-loop economy, the CE paradigm was introduced at the end of the '80s to minimise emissions, resource use, pollution and waste, and maximise the resource efficiency of material assets.
(Palafox-Alcantar et al., 2020)	A CE is a set of principles and tools which aim to contribute to the planet's sustainability by minimizing the extraction and degradation of materials, promoting resource and energy conservation (reduce, reuse, recover and recycle) and driving the regeneration of its input sources. As such it fosters a willingness to, and facilitates, the repair and upgrade of products through innovative and systems thinking and embraces waste as a primary resource, allowing its reintroduction into the consumption system. The CE is inclusive with the environment, society, governments, companies and academia, and boosts the development of resilient business models in which various forms of value are captured through cooperation.
(Salvador et al., 2020)	In summary, CE claims that human activities should follow nature's example. In nature, everything is an input to one/another process (Schulte, 2013), in a circular behavior. Thereupon, human activities should behave similarly, resembling nature's way of running natural processes. Ertz et al. (2019) say that CE has been proposed to limit the threats of excessive waste.

Ainsi, après l'analyse développée dans cette revue, nous voudrions proposer une définition de l'EC.

«L'économie circulaire est un système économique qui cherche à contribuer au développement durable (couvrir les besoins actuels sans compromettre ceux de demain), en dissociant la croissance économique de l'impact environnemental et des inégalités sociales, en redésignant la façon de consommer, de produire, d'interagir avec l'environnement et avec la société elle-même, à travers des business models innovants et une politique publique soutenue cherchant une mise en œuvre optimale des 4 R à savoir « réduire, réutiliser, recycler et récupérer », visant toujours à minimiser la consommation des ressources, avec une approche systémique au moment de son déploiement au niveau micro (entreprises et ménages), méso (synergies industrielles, régions), macro (pays et global) et de la chaîne d'approvisionnement (interaction entre les niveaux précédents). »

Ainsi, cette définition veut montrer qu'il ne faut pas considérer la croissance économique comme un ennemi ou un mal à combattre pour sauver l'environnement, mais plutôt comme un allié qui peut motiver l'innovation dans toutes les activités de la société et la mise en place des solutions qui peuvent aider tant à la conservation de l'environnement et les ressources, qu'à contribuer à lutter contre certains problèmes sociaux affectant notre société aujourd'hui, notamment la lutte contre le chômage et, enfin, à inclure davantage de personnes dans cette période de transition. Pour y parvenir, il est impératif de redesigner la façon dont on consomme (à savoir à préférer le partage des biens plutôt que les en posséder), dont on produit (appliquer l'écoconception pour une meilleure gestion des ressources tout au long du cycle de vie) et dont on interagit les uns avec les autres, car le système économique est un système où chacun de ses composants interagit, au point où si une partie reste isolée, la transition vers une économie moins nocive pour l'environnement et pour la société elle-même va s'avérer très compliquée à mener.

Ainsi, l'action doit être menée au niveau de tous les secteurs et acteurs de la société, car l'économie circulaire exige un engagement complet, y compris au niveau mondial, sans quoi, des effets indésirables pourraient survenir. Le but ultime de l'EC est de contribuer au développement durable, comme le proposent de plus en plus les chercheurs et comme la plupart des concepts associés à la construction du concept d'EC l'ont affirmé. Enfin, cette définition tente d'intégrer également l'utilisation des 4 R qui ont largement été promus par de nombreux chercheurs et décideurs, toutefois suivis de la notion d'optimalité dans le but de remplacer le principe de hiérarchie des déchets proposé par d'autres acteurs. Comme indiqué précédemment, la hiérarchie des déchets n'est peut-être pas le guide le plus utile pour l'application de ces principes car elle peut conduire à des résultats non souhaités et il faudrait une analyse systémique lors de son application. De plus, son application devrait se faire aux différents niveaux de l'économie, le micro, le méso et la macro, y compris à l'intersection de ces derniers, en gardant également à l'esprit une approche systémique. La Figure 3 : Représentation graphique de l'économie circulaire

Figure 3 présente une représentation graphique du concept d'EC.

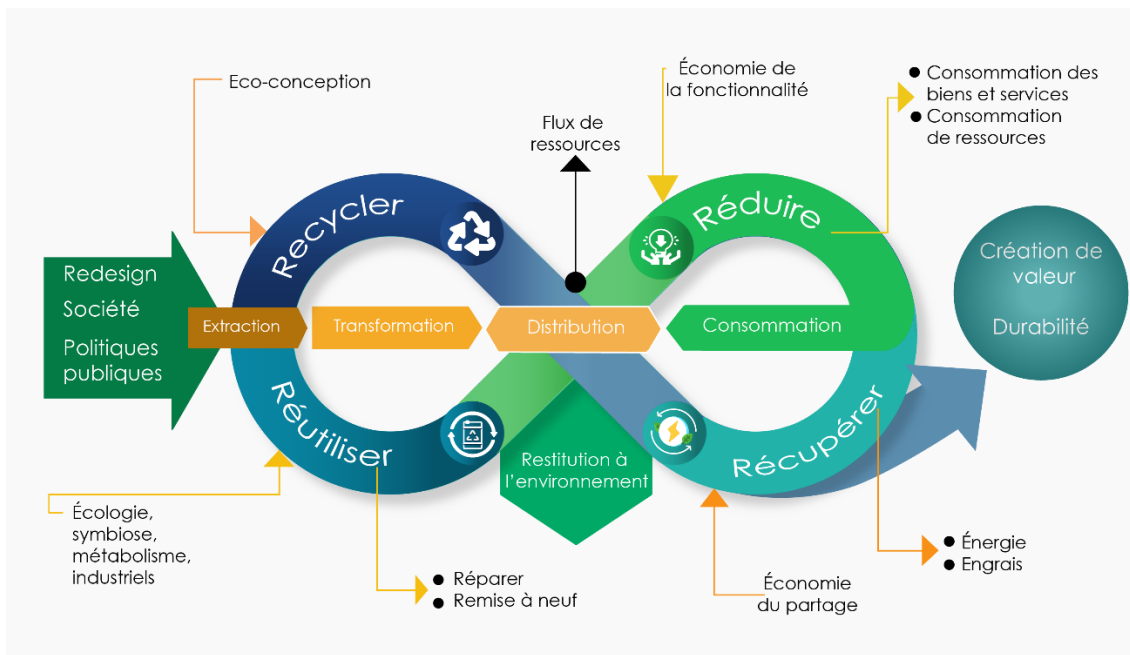


Figure 3 : Représentation graphique de l'économie circulaire

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord étudié l'histoire de l'EC, de ses origines aux concepts ayant servi de base pour construire sa notion actuelle, en passant par ses définitions variées. Ainsi, l'EC est née en tant que stratégie pouvant aider à réduire les tensions sur les ressources et les effets néfastes sur l'environnement. Elle a été influencée par différentes approches environnementales, notamment par l'écologie industrielle, le concept du berceau au berceau, l'économie de la performance, l'économie bleue, ou encore le biomimétisme. De cette façon, l'EC peut être perçue comme un concept catalytique qui crée un lien entre ces différentes approches. Ainsi, l'EC a hérité de plusieurs idées qui expliquent le manque de consensus quant à ses principes, ses objectifs et sa définition.

Nous avons également mis en évidence comment peu à peu les politiques des divers gouvernements dans le monde ont commencé à intégrer des stratégies relatives à l'EC. Ce genre de politiques ont d'abord émergé en Asie répondant à une approche pour augmenter l'efficacité en matière d'utilisation des ressources au niveau de l'industrie, puis en Europe, où ces politiques visaient une meilleure gestion des déchets. C'est la Chine qui donne un élan à l'EC comme une approche qui peut aider à découpler croissance économique et destruction de l'environnement grâce à ses premières adoptions de l'EC comme stratégie de développement dans le pays. A partir de ce moment, l'EC commence aussi à attirer l'attention des académiques.

Ainsi, nous nous sommes attachés à analyser l'évolution des études académiques portant sur l'EC afin de pointer ses principes, objectifs et définitions. Force est de constater que l'EC est considérée comme une approche qui peut contribuer à rompre le paradigme de croissance économique et de destruction de l'environnement, ciblant notamment la conservation de ressources. Ainsi, les déchets dans une EC devraient être appelés des ressources qui vont être utilisées par d'autres processus de production ou consommation, et si ce n'est pas le cas, ces ressources devront être réintégrées à l'environnement

comme des nutriments conservant toujours cette vision systémique. Cependant, l'EC a principalement été mise en œuvre du point de vue de l'économie industrielle, ciblant une meilleure utilisation des ressources au moment de la production et une meilleure gestion des déchets. Les principaux principes utilisés sont l'application des 3 R (réduire, réutiliser et recycler), auxquels s'ajoute le recyclage. Il est suggéré aussi que l'EC devrait aller au-delà de la recherche d'une augmentation de l'efficacité de l'utilisation des ressources car des effets rebonds peuvent se produire avec une augmentation de la production. L'EC devrait ainsi plutôt viser la durabilité. Enfin, l'EC devrait inclure des aspects sociaux car ce sont les individus à travers leurs comportements qui pourront changer les paradigmes et faciliter la transition vers une EC. Un soutien constant de la part de politiques publiques apparaît également indispensable.

Nous avons fini le chapitre en fournissant une définition personnelle de l'EC que nous proposons de nouveau ci-dessous pour clore ce chapitre :

«L'économie circulaire est un système économique qui cherche à contribuer au développement durable (couvrir les besoins actuels sans compromettre ceux de demain), en dissociant la croissance économique de l'impact environnemental et des inégalités sociales, en redésignant la façon de consommer, de produire, d'interagir avec l'environnement et avec la société elle-même, à travers des business models innovants et une politique publique soutenue cherchant une mise en œuvre optimale des 4 R à savoir « réduire, réutiliser, recycler et récupérer », visant toujours à minimiser la consommation des ressources, avec une approche systémique au moment de son déploiement au niveau micro (entreprises et ménages), méso (synergies industrielles, régions), macro (pays et global) et de la chaîne d'approvisionnement (interaction entre les niveaux précédents). »

Chapitre 4 – Prospective énergétique SUD PACA

Les modèles de prospective constituent des outils d'analyse incontournables des systèmes énergétiques afin d'éclaircir notamment leurs évolutions possibles. « Investigation méthodique des futurs possibles » (Brabandère & Mikolajczak, 2008) sur la base d'une connaissance pertinente du présent et du passé, la prospective permet ainsi d'explorer les trajectoires qu'un système peut suivre selon les décisions prises et les objectifs visés, dans un contexte contraint, techniquement, politiquement ou encore économiquement. La prospective permet ainsi notamment d'explorer les effets que diverses décisions peuvent entraîner dans l'évolution des systèmes énergétiques et de discuter les choix possibles qui en découlent.

Comme montré, cet intérêt croissant pour les études de prospective des systèmes énergétiques s'est également étendu aux territoires infranationaux, étant possible et pertinent d'établir des solutions spécifiques selon la réalité du territoire, en termes de structure économique et de disponibilité des ressources. Les territoires peuvent également répondre aux défis énergétiques spécifiques de la région sur la base de ses potentiels énergétiques. Il est en outre possible de prioriser des solutions différentes ou complémentaires entre différents secteurs comme l'urbanisme, le transport et le logement, conduisant éventuellement à des actions plus dynamiques pour une transition énergétique rapide (F. Poupeau, 2010). Tout cela positionne les territoires comme des acteurs incontournables dans la mise en place de solutions pour la transition énergétique. Ce phénomène se retrouve dans les politiques énergétiques françaises qui, depuis déjà une vingtaine d'années, se déclinent à l'échelle des territoires : la loi TECV (ou LTECV) de 2015 marque en ce sens la dernière étape majeure et récente de décentralisation française dans ce domaine.

Enfin, nous avons mis en exergue l'intérêt croissant porté dans le monde par les gouvernements et les entreprises à l'économie circulaire (EC) dans la mesure où cette stratégie pouvait permettre de réconcilier activité économique et environnement. Des actions promouvant l'EC se développent ainsi de plus en plus dans tous les domaines. En France, l'économie circulaire prend un élan remarquable avec la LTECV qui l'intègre officiellement dans la loi française. Cette loi encourage notamment une consommation plus stratégique et responsable de ressources. Ainsi, l'économie circulaire prend progressivement de la place dans toutes les activités de notre société. C'est le cas notamment des systèmes énergétiques lesquels se trouvent au cœur des problématiques liées au changement climatique et à la surconsommation des ressources.

Par conséquent, les enjeux de transition énergétique et d'économie circulaire se retrouvent particulièrement dans les perspectives de développement des régions. Ce phénomène soulève diverses questions : tout d'abord, comment les régions peuvent-elles se positionner par rapport aux objectifs de transition énergétique de la France ? Autrement dit, comment peuvent-elles contribuer aux objectifs nationaux de décarbonation ? Cela se traduit notamment par le besoin d'intégrer les différents documents directeurs dans les politiques énergétiques régionales et d'orienter le développement de leur système énergétique suivant une démarche d'économie circulaire. En outre, il s'agit de réfléchir aux emplacements où développer les énergies renouvelables. Faut-il prioriser le développement des ressources à proximité de pôles urbains à forte consommation énergétique, ou est-il préférable de développer la production dans les zones rurales et d'acheminer cette production vers les zones à forte consommation ? Quel est le mix optimal à développer ? Faut-il prioriser la

production provenant des ressources dépendantes du climat ? Le cas échéant, quelle est la meilleure stratégie pour mieux capter la production variable ? Si nous entrons dans une logique d'EC, faut-il mettre plus d'effort dans le développement des technologies de récupération d'énergie ?

Dans le présent chapitre, nous étudions le cas de la transition énergétique et d'économie circulaire de la région SUD PACA. La région dispose d'un important potentiel de ressources renouvelables sous-exploitées et elle est marquée par une concentration de la production et de la consommation d'énergie dans les zones littorales. Les activités industrielles très énergivores y sont également localisées mais celles-ci montrent un potentiel important d'augmentation de l'efficacité énergétique à travers des techniques de récupération de l'énergie fatale. Depuis les années 2000, la politique énergétique de la région était axée principalement sur la promotion des politiques pour agir sur l'efficacité énergétique et la maîtrise de la demande. Cela change avec le SRDDET, où la région établit différents objectifs ciblant un territoire neutre en carbone à l'horizon 2050. Ces objectifs proposés par la région priorisent le développement des énergies renouvelables présentes dans la région, principalement solaires, ainsi qu'une réduction de la consommation énergétique. Pour mieux profiter de la production provenant de panneaux photovoltaïques, et suivant le « *Plan du déploiement de l'hydrogène Française* » (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2018), la région SUD PACA a adopté son propre « *Plan régional hydrogène* » (Region SUD, 2020) pour développer la filière dans la région. Ainsi, ces mesures envisagées par la région ne représentent qu'une trajectoire éventuelle que le système énergétique régional pourrait suivre. Nous voulons donc analyser ici d'autres chemins pouvant guider la région vers une transition énergétique, tout en respectant les principes de l'économie circulaire (EC). Il nous faut pour cela établir la définition de ces trajectoires de transition énergétique et d'économie circulaire de la région pour mieux les analyser par la suite.

Après avoir présenté l'outil choisi pour l'étude de prospective du système énergétique de la région SUD PACA, avec ses caractéristiques et spécificités, nous décrirons le panorama énergétique de la région SUD PACA et dresserons plus particulièrement l'état des lieux de son système énergétique. Nous continuerons avec une description des procédés de construction de ce nouveau modèle original adapté à notre cas d'étude, appelé TIMES SUD PACA, les données utilisées et les diverses hypothèses posées.

4.1. Le modèle TIMES

Le critère dominant pour la classification des modèles énergétiques a été historiquement la différenciation *bottom-up/top-down* (Postic, 2016). D'une part, les modèles *top-down* étudient l'interaction entre l'évolution du système énergétique et le reste de l'économie, suivant une représentation très agrégée des secteurs à travers des variables macroéconomiques, ce qui ne permet pas de regarder l'effet du choix des technologies sur l'ensemble du système (Assoumou, 2006). D'autre part, les modèles *bottom-up* explorent plus en détail l'évolution des systèmes énergétiques sur la base d'une représentation fine des systèmes étudiés, avec leurs caractéristiques technico-économiques respectives et les niveaux de ressources disponibles. La relation entre technologies est faite à travers la transformation de commodités entrantes et sortantes du procédé en question (input et output) et de fait les flux énergétiques. Ici, les variables économiques sont des inputs exogènes. Ce type de modèle nous renseigne sur la structure optimale du système et sur les investissements associés, ce qui est essentiel pour les démarches de prospective des régions et l'aide à la décision quant à leurs choix stratégiques.

Notre analyse s'appuie donc sur une approche *bottom-up* et plus précisément sur l'outil TIMES (*The Integrated MarkAI-EFOM System*) sur la base duquel nous avons modélisé le système énergétique de la région SUD PACA et construit le modèle TIMES SUD PACA. Par l'ajout de diverses contraintes, qui portent essentiellement sur les ressources disponibles, le rythme de développement des technologies et les flux de commodités, nous avons alors construit différentes trajectoires compatibles avec la transition énergétique et l'EC dont nous visons l'analyse.

4.1.1. Un générateur de modèles *bottom-up* d'optimisation linéaire

TIMES est un outil de prospective développé dans le cadre du « *Energy Technology Systems Analysis Program* » (ETSAP) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) et construit sur la base du modèle « *Market Allocation* » (MarkAI) combiné avec le modèle « *Energy Flow Optimisation Model* » (EFOM) (Loulou et al., 2016). TIMES n'est pas un modèle *per se* mais plutôt un générateur de modèles *bottom-up*, c'est-à-dire, un ensemble d'équations génériques (décrites dans le langage GAMS¹⁷) qui définissent les relations par lesquelles les données fournies par l'utilisateur seront liées, créant ainsi un modèle mathématique cohérent. Aujourd'hui, le générateur TIMES est largement utilisé dans des études de prospective à différentes échelles spatiales, mondiales (Didelot et al., 2017; Kang, 2017), régionales (Postic et al., 2017), nationales (Assoumou, 2006; Millot, 2020; Selosse et al., 2018) et infranationales (Bouckaert, 2014; Drouineau, 2012). Des modèles TIMES sont développés par plus de 150 équipes de recherche dans 50 pays différents. Le générateur et ses applications bénéficient d'un grand soutien de la part de la communauté de modélisateurs de l'ETSAP qui se réunit plusieurs fois par an pour échanger sur des résultats des différents travaux de prospective et sur des possibles évolutions des approches et des modèles.

TIMES repose sur un équilibre partiel suivant un paradigme d'optimisation linéaire, il cherche ainsi à minimiser le coût total actualisé de l'ensemble du système énergétique étudié tout en satisfaisant la demande exogène et en respectant les diverses contraintes établies par l'utilisateur (économiques, techniques et environnementales). En outre, TIMES permet une représentation fine du système énergétique étudié, au regard de ses caractéristiques technico-économiques détaillées, et de l'interaction des différentes commodités avec les procédés d'extraction, de transformation, de transport et de distribution, particulièrement en signalant les flux de commodités entre technologies de transformation et de consommation. L'objectif reste de trouver un équilibre offre-demande, c'est-à-dire de maximiser le surplus sur tout l'horizon temporel au moindre coût actualisé. Le problème mathématique ainsi construit est résolu avec l'optimiseur CPLEX qui utilise l'algorithme SIMPLEX, et c'est le plus souvent à travers le logiciel VEDA¹⁸, « *Versatile Data Analyst* », (KanORS, n.d.) que l'utilisateur peut interagir avec le code mathématique et exporter la trajectoire calculée par le solveur. Les principales sorties du modèle sont la nouvelle structure du système énergétique au fur et à mesure des années de la période considérée et pour chaque zone géographique implémentée, les flux de commodités, les émissions de gaz à effet de serre pour chaque technologies concernées, les capacités installées et les niveaux d'activité des technologies, les coûts marginaux de certaines commodités et les investissements réalisés. Il est donc possible avec TIMES d'explorer divers chemins qu'un système énergétique peut suivre selon des scénarios contrastés, afin de discuter si un objectif est réalisable ou

¹⁷ GAMS ou « *General Algebraic Modeling System* ».

¹⁸ On notera que Veda est également un terme antique hindou qui se traduit par vision ou connaissances.

pas selon les actions envisagées et enfin, proposer des actions guidant vers l'atteinte d'une ambition spécifique.

4.1.2. Le système énergétique de référence

Une des caractéristiques les plus intéressantes des modèles *bottom-up*, et notamment du modèle TIMES, est la possibilité de tracer en détail la relation que chaque commodité peut avoir avec les technologies, et comment ces commodités sont ensuite transformées et allouées à la consommation finale d'énergie. Cet ensemble de relations forme un graphe nommé *Système Énergétique de Référence* (RES). Un exemple de RES est donné dans la Figure 4.

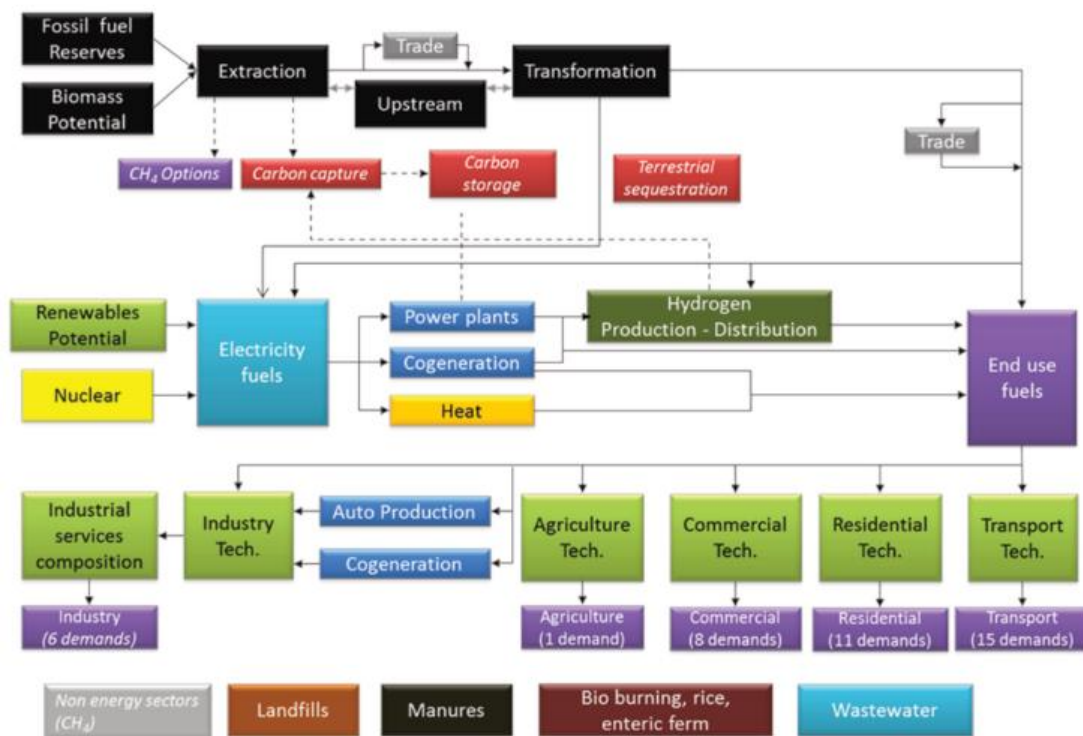


Figure 4 : Exemple de système énergétique de référence (RES) du modèle TIMES mondial, TIAM-FR (Kang, 2017)

Sont de la sorte détaillés pour chaque technologie existante ou utilisable, divers paramètres technico-économiques tels que les rendements, la durée de vie, le facteur de charge, les capacités installées ainsi que les coûts fixes et variables et, pour les technologies à développer, les coûts d'investissements. Les émissions de gaz à effet de serre associées aux technologies sont également considérées et paramétrées.

4.1.3. Structure mathématique

Le modèle mathématique généré par TIMES prend ainsi la forme d'un problème d'optimisation linéaire, dont l'objectif est de trouver la solution la moins coûteuse du système énergétique satisfaisant toutes les contraintes : demande exogène, disponibilité des ressources, contraintes techniques, limites d'émissions, scénarios politiques, etc. Ce problème d'optimisation linéaire correspond aux équations suivantes :

$$\min z = \sum_{j=1}^n c_j X_j \quad (1)$$

$$X_i \geq 0, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_i a_{ij} X_i \geq b_j \quad (3)$$

L'équation 1 décrit la fonction objectif du modèle, c'est-à-dire le coût total actualisé à minimiser tenant compte de l'ensemble des coûts (c) et des variables de décision (X). Les équations 2 et 3 correspondent aux contraintes que la solution doit respecter. Les variables techniques sont représentées par (a), et (b) fait référence à la demande finale. Ces valeurs sont fixées par l'utilisateur. La résolution du problème d'optimisation délivre, pour chaque période et chaque région, les valeurs des variables de décision et le coût marginal associé à chaque contrainte.

La fonction objectif du modèle TIMES intègre la valeur actuelle nette des coûts totaux annualisés du système énergétique pour toutes les régions et périodes. Ainsi, l'équation 1 devient :

$$(NPV) = \sum_{r \in R} \sum_{y \in Y} (1 + \alpha(r))^{y_{ref} - y} ANNCOST(r, y) \quad (4)$$

- *NPV* est la valeur actuelle nette du coût total pour toutes les régions ;
- $\alpha(r)$ est le taux d'actualisation général ;
- *Yref* constitue l'année de référence ;
- *ANNCOST*(*r*, *y*) est le coût total annuel dans la région *r* dans l'année *y* ;

Cette expression inclut :

- les coûts d'investissements et démantèlement,
- les coûts fixes et variables,
- les coûts d'importation et d'extraction des commodités et les revenus d'exportations,
- les impôts et subventions,
- les revenus liés au recyclage des commodités après démantèlement d'une technologie,
- la valeur de récupération pour tenir compte de ce qui arrive aux processus après l'horizon temporel du modèle (suppression de l'effet de frontière).

Les variables de décision et les paramètres relatifs au formalisme TIMES sont indexés de la façon suivante :

- $r \in R$ correspond à la région appartenant à l'ensemble de régions *R*
- $t \in T$ représente la période de l'ensemble des périodes *T*
- $v \in V$ indique l'année d'investissements
- $p \in P$ est la technologie appartenant à l'ensemble des technologies *P*
- $c \in C$ est la commodité appartenant à l'ensemble des commodités *C*
- $s \in S$ est la sous-période pertinente uniquement pour les processus / commodités définis à un niveau plus fin qu'annuel

Les variables de décision *X* des équations précédentes se présentent selon ces relations :

Capacités installées

$$CAPT(r, t, p) = \sum_{t' \leq t - t' < LIFE(r, t', p)} NCAP(r, t', p) + RESID(r, t, p)$$

Cette équation montre que la capacité totale disponible d'une technologie p dans la région r et dans la période t correspond à la somme des investissements réalisés avant et durant la période t , et des capacités résiduelles (investissements réalisés avant l'année de référence et toujours opérationnels dans la période t dans la région r).

Relation entre la capacité installée des technologies et leur activité

$$ACT(r, v, t, p, s) \leq AF(r, v, t, p, s) * CAP2ACT(r, p) * FR(r, s) * CAP(r, v, t, p)$$

L'équation ci-dessus exprime que la capacité installée d'une technologie p peut être utilisée à son maximum ou partiellement selon le facteur d'activité AF défini par l'utilisateur. Ce dernier peut être soumis à des découpages temporels s : par exemple pour les technologies qui n'ont pas d'activité pendant des périodes de nuit (photovoltaïque), le facteur d'activité est à 0 (pendant la période de nuit) alors qu'il est strictement positif pendant la journée. Le facteur $CAP2ACT$ permet la conversion entre les unités de capacité et d'activité.

Relation entre le niveau d'activité et les flux de commodités

$$ACT(r, v, t, p, s) = \sum_{c \in PCG} \frac{FLOW(r, v, t, p, c, s)}{actflo(r, v, p, c)}$$

L'activité d'un processus p est liée à la relation des flux ($FLOW$) des commodités c entrant ou sortant de la technologie p avec un facteur de conversion $actflo$ (généralement égal à 1).

Equation d'équilibre des commodités

$$\sum PROD(r, t, c, s) + \sum Imp(r, t, c, s) \geq \sum Cons(r, t, c, s) + \sum Exp(r, t, c, s)$$

La somme de la production d'une technologie avec les importations doit s'équilibrer avec la somme de la quantité consommée et exportée. Cette expression est une inégalité dans le cas des vecteurs énergétiques, des émissions et des demandes ; elle est une égalité pour les commodités où la quantité produite et importée est égale à la quantité consommée.

4.2 Panorama de la région SUD PACA

La région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur est un territoire français qui se trouve au sud-est du pays. Elle est limitée au sud par la mer Méditerranée, à l'est par l'Italie, au nord par la région Auvergne-Rhône-Alpes et à l'ouest par la région Occitanie.

La région est formée de six départements. Trois sont localisés au nord de la région, les Alpes-de-Haute-Provence (AHP), les Hautes-Alpes (HA) et le Vaucluse (VAUC) ; les trois restants se situent sur la zone littorale : les Alpes-Maritimes (AM), les Bouches-du-Rhône (BDR) et le Var (VAR). Elle compte environ 5 200 000 habitants en 2017 (INSEE, 2017), 80 % des habitants sont situés dans les départements du littoral, les Bouches-du-Rhône regroupant 40 % de la population. Les principales villes sont Marseille dans les Bouches-du-Rhône, Nice dans les Alpes-Maritimes, Toulon dans le Var et Avignon dans le Vaucluse.

En 2017, avec 166 000 M€ de PIB, la région se positionne à la sixième place de toutes les régions françaises mais en troisième position s'agissant du PIB par habitant (32 215 €/habitant) (Insee, 2021). Depuis l'année 2005, la région connaît une croissance économique de 0,8% en moyenne, une croissance similaire à celle que la France a eue sur la même période, de 0,9% en moyenne (INSEE, 2018).

La région SUD PACA se caractérise par une économie forte, avec des activités variées qui présentent une trajectoire historique bien positionnée sur le marché. Le secteur tertiaire se démarque cependant, environ 75 % de la valeur ajoutée venant du secteur des services marchands et non marchands, et 8 emplois sur 10 étant concentrés dans ces activités. Ces services concernent principalement le tourisme, les services aux entreprises et les commerces. En 2017, la région SUD PACA est la troisième industrie manufacturière en France ayant eu la croissance la plus importante parmi les régions françaises, de 6,4%. Les activités industrielles se situent principalement dans les Bouches-du-Rhône, avec une présence importante de l'industrie chimique et de la sidérurgie, tandis que le département des Alpes-Maritimes compte la présence importante de l'industrie du ciment. Dans le reste de la région, il s'agit principalement de l'industrie chimique, de la parfumerie et de l'industrie pharmaceutique.

4.2.1. Contexte énergétique

Entre 2007 et 2017, la consommation d'énergie finale de la région SUD PACA connaît une réduction de 17 %, passant de 614 PJ en 2007 à 509 PJ en 2017 malgré une croissance de la population de 3 % Figure 5. Cette réduction est principalement due à celle de la consommation d'autres énergies non renouvelables¹⁹ de 63 % dans le secteur de l'industrie. Sans tenir compte de cette réduction, la consommation de la région diminue de 4 %. La tendance change cependant sur les cinq dernières années où la consommation reste relativement stable et affiche une faible augmentation de 0,15 %.

Du côté des énergies finales, la période 2007-2017 enregistre une baisse significative de 12 % de l'utilisation des produits pétroliers, tandis que la consommation de gaz naturel augmente de 7 %. La consommation d'électricité reste stable autour de 130 PJ bien qu'on note une faible réduction de 1 %. L'énergie renouvelable principalement utilisée par la région est de loin le bois dont la consommation augmente de 18 %.

¹⁹ Pour la région SUD PACA, la catégorie autres énergies non renouvelables varient fortement selon l'activité industrielle. De manière générale, cette catégorie est constituée des énergies suivantes : Ordures ménagères (non organiques), déchets industriels solides, pneumatiques, plastiques, solvants usagés, gaz de cokerie, gaz de haut fourneau, mélange de gaz sidérurgiques, gaz industriel, gaz d'usine à gaz, gaz d'aciérie, hydrogène. Par exemple, pour la sidérurgie, les principaux éléments constituant cette catégorie sont le charbon et les produits dérivés. <https://cigale.atmosud.org/documentation.php>. Pour le secteur de la sidérurgie, la consommation d'autres énergies non renouvelables correspond principalement à la consommation du charbon.

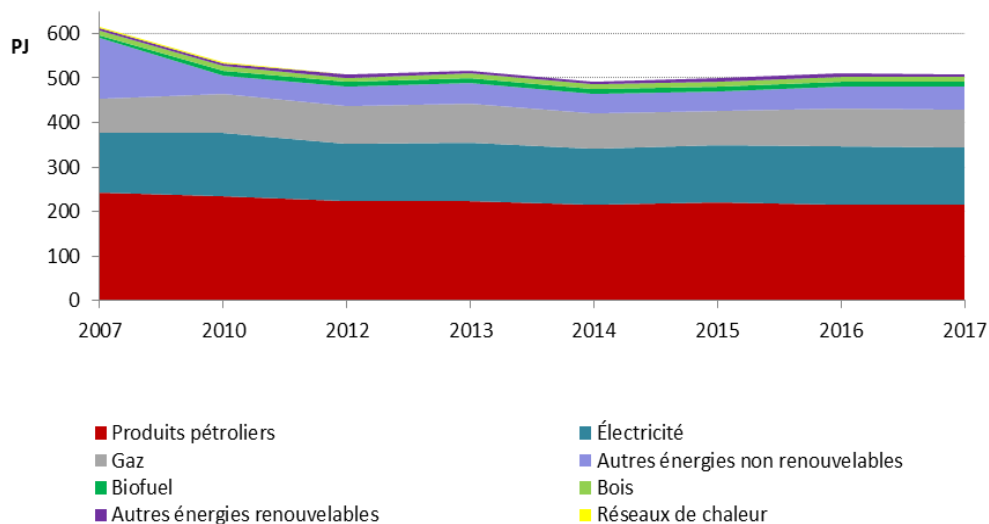


Figure 5 : Consommation par type d'énergie finale de la région SUD PACA pour la période 2007 - 2017

La consommation du secteur industriel a diminué de 40 % entre 2007 et 2017. Ainsi, si la région SUD PACA a vu sa consommation énergétique diminuer, cela résulte principalement de la réduction de la consommation énergétique du secteur industriel, due non pas à des changements structurels mais à la fermeture de deux pôles de consommation majeurs suivant la crise de 2008, la raffinerie de Lyondell Basell et l'usine de Cabot France (producteur de noir de carbone), qui ont cessé leurs activités en 2009. Nous n'avons pas identifié d'autres changements structurels pouvant suggérer des variations dans les niveaux de demande énergétique régionale à court terme. Jusque-là, le secteur industriel était le premier consommateur énergétique de la région, il se place dès lors en deuxième position, derrière le secteur du transport dont la consommation énergétique reste stable sur toute la période (faible augmentation de 0,3 %) (Figure 6).

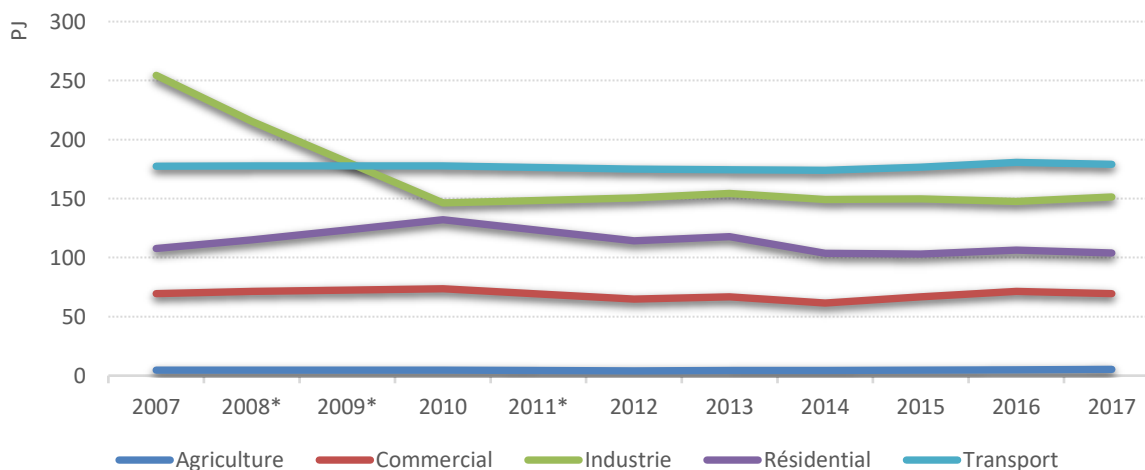


Figure 6 : Consommation énergétique par secteur de consommation de la région SUD PACA²⁰

Le secteur résidentiel, en troisième position, voit sa consommation réduite de 3,4 % entre 2007 et 2012, tandis que celle du secteur tertiaire croît faiblement, de 1 %. On notera que les années où les conditions météorologiques ont été plus froides pendant l'hiver, la consommation énergétique du

²⁰ Les années marquées avec « * » sont interpolées car les données de consommation d'énergie finale disponibles pour la région n'incluent pas ces années

secteur résidentiel a augmenté significativement, par exemple en 2010 et 2013. La consommation énergétique du secteur agricole n'augmente que peu sur la période et finalement, la consommation totale reste similaire à celle de 2007 sur cette période.

Dans la Figure 7²¹, nous pouvons observer que les principales réductions de consommation concernent le secteur industriel, pour tous les départements et plus spécialement BDR. Ce département représente à lui seul plus de 90 % de la réduction de la consommation régionale entre 2007 et 2017. Si on considère la consommation de l'industrie à partir de 2010, la consommation énergétique des BDR a augmenté de 7%. Dans les autres départements, la consommation du secteur industriel diminue aussi fortement. Par exemple, entre 2007 et 2017, la réduction de la consommation de ce secteur dans les AM est de 21 % et dans le Var de 16 %. Concernant le secteur de l'habitat, sur les dix dernières années, son évolution est similaire dans tous les départements avec une diminution moyenne de 17 %, sauf pour les HA qui enregistre une réduction de 11 %. Enfin, la consommation du secteur du transport se différencie entre les départements sur la zone littorale qui montrent une augmentation de 2 % en 2017 par rapport à 2007 et les départements au nord de la région dont la consommation est réduite de 3 %.

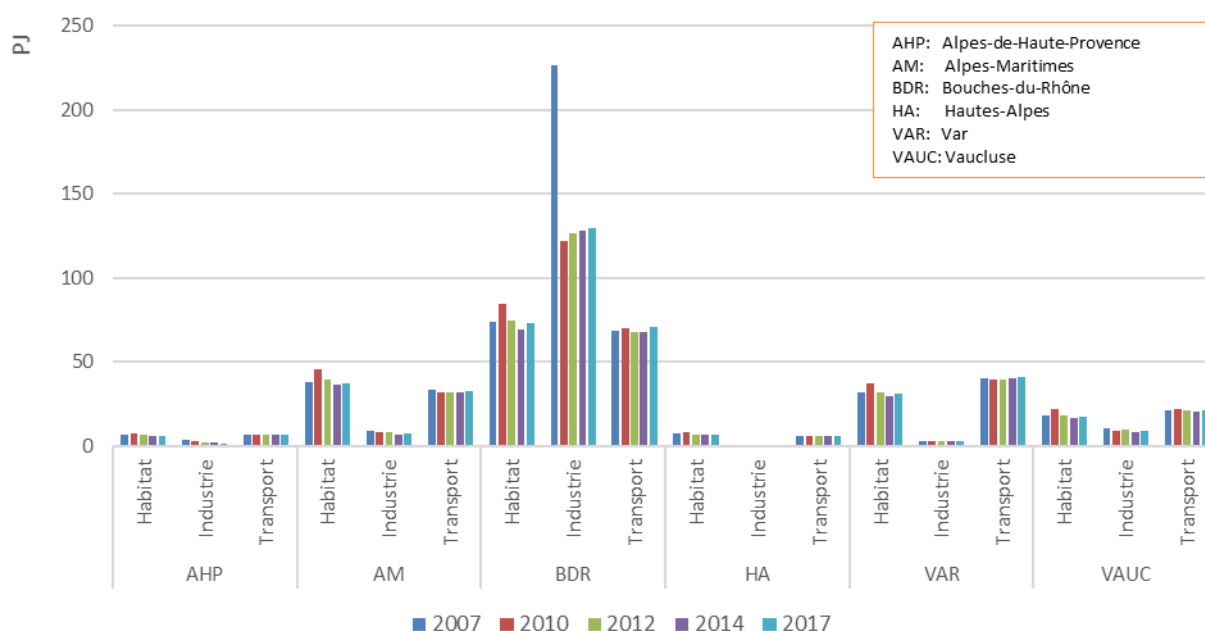


Figure 7 : Consommation énergétique par secteur et par département de la région SUD PACA

La région SUD PACA est la quatrième région française la plus consommatrice d'énergie avec une consommation de 509 PJ. En 2017, la consommation d'énergie finale de la région SUD PACA est constituée à 42 % de produits pétroliers, à 25 % d'électricité, à 17 % de gaz naturel, à 10 % d'énergies non renouvelables et à environ 2 % de bois, le reste étant couvert par les autres énergies renouvelables. Comme vu précédemment, le secteur du transport est le plus important avec 35 % de l'énergie consommée en 2017, presque totalement des produits pétroliers (Figure 8). Ce secteur représente d'ailleurs plus de 40 % des dépenses énergétiques de chacun des différents départements

²¹ Le secteur de l'habitat inclut le secteur résidentiel et tertiaire. Le secteur de l'agriculture n'est pas inclus dans le graphique car sa consommation est trop faible par rapport aux autres secteurs et donc n'est pas visible.

de la région, sauf pour les BDR où le secteur du transport ne représente que 26 % de la consommation énergétique totale.

En deuxième position avec 30 % de la demande énergétique de la région, l'industrie a principalement recours à des énergies fossiles à 42 % (20 % de produits pétroliers et 22 % de gaz naturel) suivies par la consommation d'autres énergies non renouvelables²² à 33 %. L'électricité ne compte que pour 20 %. Enfin, les secteurs résidentiel et tertiaire représentent ensemble 34 % de la consommation de la région, principalement sous forme d'électricité (55 %) et de gaz naturel (30 %).

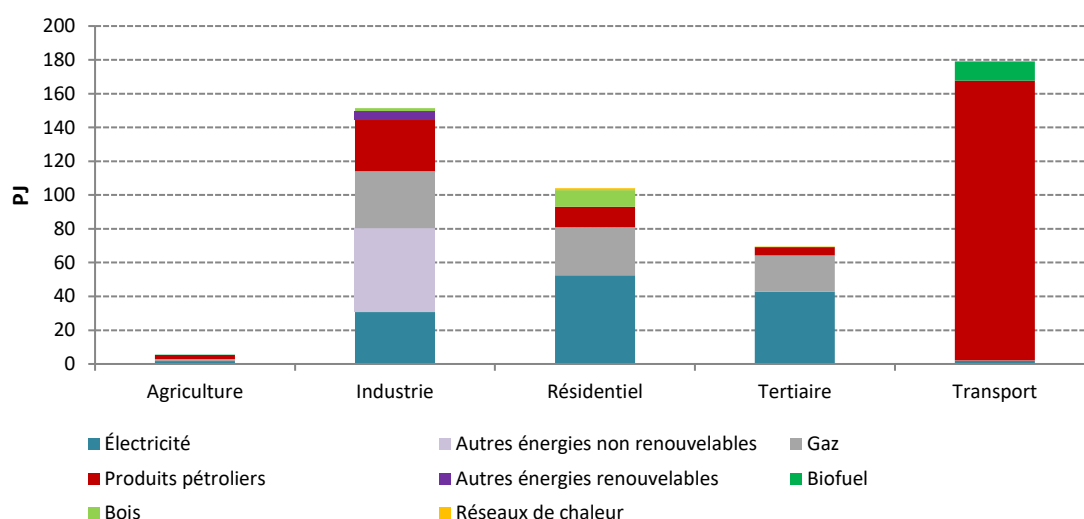


Figure 8 : Demande énergétique par secteur d'activité et par type d'énergie en 2017

Ainsi, nous avons observé de manière générale comment la consommation énergétique avait évolué au niveau régional et par secteur. Nous allons maintenant approfondir l'analyse de chaque secteur de la demande afin de mieux identifier leur évolution et leurs caractéristiques.

4.2.2. Le secteur du transport

Globalement, la consommation de ce secteur a augmenté légèrement (1 %) pendant la période 2007-2017. Cette augmentation résulte surtout de l'évolution de ce secteur dans les BDR qui représentent presque 40 % de la consommation totale du secteur, et de celle du Var qui a augmenté de 1 %. Dans le reste des départements, la consommation a diminué en moyenne de 2 %. Les fluctuations de la demande de ce secteur dépendent principalement de la conjoncture économique. Cela se vérifie notamment pour la consommation des poids lourds²³ (qui représente en 2017 36 PJ soit 21 % de la consommation du secteur de transport) qui a baissé pendant les périodes de crise économique, notamment après 2008 et en 2014 : leur consommation globale a ainsi diminué de 5 % entre 2007 et 2017. Cette tendance est aussi visible dans les kilomètres parcourus par ce type de véhicules avec une légère diminution sur la période (- 0,17 %). Ce comportement est observé dans tous les départements.

²³ La consommation des poids lourds intègre la consommation du transport de marchandises et de bus

Un autre facteur qui affecte la consommation du secteur de transport est le comportement des usagers et la façon dont ils choisissent leur mode de déplacement. Dans la région SUD PACA, la consommation énergétique du transport est singulièrement élevée, ce qui s'explique par une forte présence de véhicules particuliers qui représentent 55 % (98 PJ) de la consommation du secteur. En effet, presque 50 % des ménages possèdent un véhicule et 32 % d'entre eux en possèdent deux ou plus²⁴, ce qui veut dire que près de 81 % des ménages sont motorisés (INSEE, 2021). En outre, le taux de remplissage des véhicules est d'environ 1,2 personnes (AtmoSud, 2017). Sur la période 2007-2017, la consommation énergétique des véhicules particuliers a augmenté de 1 %, une hausse portée principalement par la consommation du département des BDR qui a augmenté de 3 %. Dans les autres départements, la consommation des véhicules particuliers a diminué d'environ 1 %, même si les kilomètres parcourus ont quant à eux augmenté d'environ 6 %, suggérant un recours à des véhicules plus efficaces sur le plan énergétique. En effet, près de 40 % du parc de véhicules dans la région a 5 ans ou moins. Les véhicules électriques dans les départements du littoral et dans le Vaucluse ne représentent cependant que 0,1 % de la consommation énergétique des véhicules particuliers, en dépit d'une croissance très importante au cours de la dernière décennie. Quant aux nouveaux véhicules immatriculés par an, dont les données sont disponibles depuis 2010 et jusqu'à 2019, on note que le nombre a baissé de 19 % entre 2010 et 2014, puis la tendance est repartie à la hausse jusqu'en 2019, avec une croissance annuelle moyenne de 4 %.

Concernant les véhicules à deux roues, leur consommation a crû de 13 % et les kilomètres parcourus de 6 %. Dans le cas des véhicules utilitaires, la demande d'énergie n'a augmenté que de 1 % tandis que les kilomètres parcourus ont augmenté de 10 %. Enfin, la consommation des trains est 25 % plus élevée en 2017 qu'en 2007 et celle de l'aviation de 13 % sur la même période

Ce secteur montre ainsi des besoins en mobilité croissants, mais l'utilisation de véhicules plus performants a permis de contenir la hausse de la consommation énergétique du secteur.

4.2.3. L'industrie

Le secteur industriel est le deuxième poste le plus consommateur d'énergie de la région, avec une demande de 151 PJ (30 % de la consommation régionale). La chimie est l'activité industrielle qui demande le plus d'énergie dans la région, comptant pour 33 % du total. Cette demande d'énergie est concentrée dans le département des Bouches-du-Rhône à hauteur de 86 %, en raison de la présence du port de Marseille, un des ports les plus importants d'Europe. Un tel port permet une réduction des coûts liés à la logistique ce qui attire les industriels à proximité. L'industrie présente dans ce territoire est très énergivore (sidérurgie, chimie, etc.). En deuxième localisation, on trouve l'industrie dans Vaucluse. Ce département constitue géographiquement un point de connexion entre le nord et le sud de la région. Les Alpes-Maritimes se positionnent en troisième place avec notamment des activités de production de ciment.

Les principales réductions de consommation par type d'énergie entre 2007 et 2017 sont survenues au niveau des autres énergies non renouvelables²⁵ (-0,63%), suivi des produits pétroliers (-34 %) et le bois

²⁴ Par comparaison avec le niveau en France, 47 % des ménages possèdent un véhicule et 35 % en possèdent 2 ou plus, ainsi le taux de motorisation est de 81 %.

²⁵ Pour rappel, la consommation d'autres énergies non renouvelables pour l'activité de de la sidérurgie correspond à la consommation principalement du charbon.

(-28 %), tandis que la consommation du gaz a augmenté de 7 %. Malgré l'importante réduction de la consommation d'autres énergies non renouvelables, elle continue à être l'énergie la plus consommée dans le secteur industriel en 2017 et couvre 33 % de la consommation d'énergie finale du secteur (Figure 9). Si on regarde l'évolution de la consommation pendant la période 2012-2017, la tendance est différente, avec une augmentation de la consommation de 20 % pour les autres non renouvelables, 4 % pour le gaz et 10 % le bois et une réduction de la consommation de 18 % pour les produits pétroliers et de 22 % pour les autres non renouvelables. Des tendances similaires sont enregistrées dans tous les départements, mais à relativiser au regard du poids de l'industrie dans ces derniers.

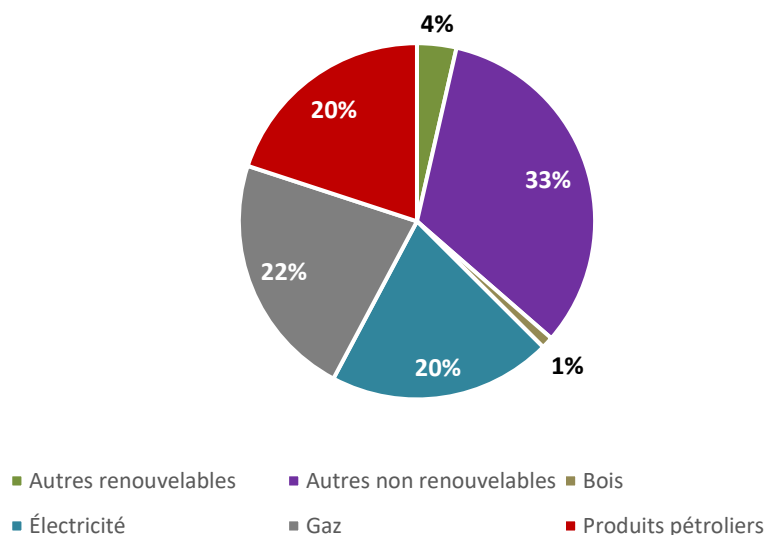


Figure 9 : Part de chaque énergie dans la consommation finale du secteur de l'industrie en 2017

L'évolution de la consommation des différents types d'industrie a été fortement affectée par la crise financière de 2008. Elle s'est ainsi réduite sur la période pour toutes les différentes activités sauf pour la sidérurgie et la métallurgie, dont la consommation continue d'augmenter. D'ailleurs, pour la période 2012-2017, la croissance de consommation énergétique du secteur industriel, certes faible avec 0.42 %, provient de la hausse de l'activité de la sidérurgie et de la chimie.

4.2.4. Le secteur résidentiel

Le secteur résidentiel constitue le troisième poste de consommation de la région SUD PACA, à hauteur de 104 PJ (20 % du total). L'électricité est l'énergie la plus utilisée pour couvrir les usages énergétiques de ce secteur, et elle satisfait 51 % de la demande (Figure 10). Le gaz naturel couvre 27 % des besoins et, en troisième source, se trouvent les produits pétroliers avec 12 % de la demande d'énergie finale du secteur. Le poste énergétique le plus important reste le chauffage (43 %), suivi par les autres usages électriques (25 %) correspondant au lavage, au froid ou à l'éclairage. Enfin, la production d'eau chaude sanitaire compte pour 21 % de la consommation.

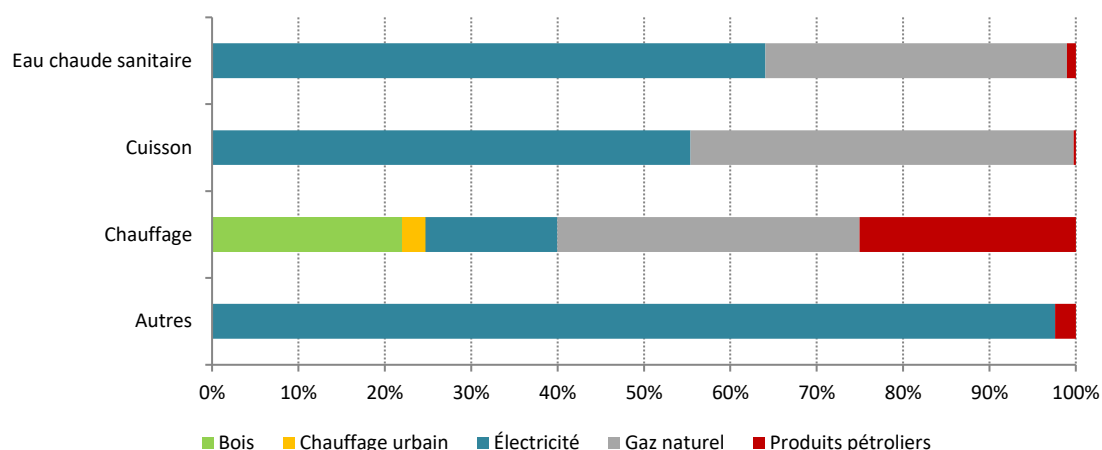


Figure 10 : Consommation par type d'énergie et par service énergétique dans le secteur résidentiel en 2017

Du point de vue de la répartition géographique, les Bouches-du-Rhône se placent en première place de la consommation énergétique du secteur résidentiel 41 %, suivie par les Alpes-Maritimes et le Var qui représentent chacun 20 %. En termes de demande de services énergétiques, on constate une différence importante entre les départements en raison des variations météorologiques pendant l'année. Dans les Hautes-Alpes, la consommation de chauffage représente ainsi 72 % de toute la consommation du secteur résidentiel tandis qu'elle ne représente que 57 % dans les Alpes-de-Haute-Provence et autour de 40 % de la demande dans les autres départements. De la même façon, la demande d'eau chaude sanitaire, dont l'usage est plus faible dans les territoires du nord de la région, en représente environ 10 %, tandis qu'elle est de 23 % dans les départements plus au sud. Par contre, la demande pour les divers usages de l'électricité est plus homogène dans tout le territoire, autour de 25 % de la consommation du secteur. On retrouve enfin la cuisson qui représente 12 %.

Résidentiel (PJ)	2007	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Croissance 2017/2007
Chauffage	60	78	63	67	50	47	47	45	-25 %
		31 %	-19%	6%	-26%	-6%	0%	-4 %	
Cuisson	9	10	10	9	10	11	12	11	25 %
		14 %	-6 %	-5 %	9 %	7 %	8 %	-4 %	
Eau Chaude Sanitaire	19	21	20	19	20	21	23	22	17 %
		12 %	-7 %	-4 %	7 %	5 %	7 %	-3 %	
Autres usages	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	14 %
		4 %	3 %	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	
Usages spécifiques de l'électricité	20	22	21	22	23	24	25	25	28 %
		12 %	-4 %	4 %	5 %	2 %	5 %	3 %	
TOTAL	108	132	114	118	104	103	106	104	-3 %
		23 %	-14 %	3 %	-12 %	-1 %	3 %	-2 %	
Population (Milliers)	4 864	4 899	4 936	4 954	4 983	5 008	5 022	5 031	3.4 %
		0.7 %	0.7 %	0.4 %	0.6 %	0.5 %	0.3 %	0.2 %	

Tableau 9 : Evolution de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel par type d'usage

Les dix dernières années, ce secteur a vu une réduction de sa consommation d'environ 3 % malgré une croissance de la population de 3 % (environ 0,5 % par an) comme on le voit dans le Tableau 9. Le besoin

de chauffage est l'unique poste de consommation du secteur résidentiel qui montre une décroissance de 25 %, ce qui compense l'augmentation des consommations des autres besoins énergétiques du secteur. Cette tendance est d'ailleurs partagée par tous les départements de la région. Ces réductions sont principalement l'effet des avancées en matière d'amélioration de l'isolement et de la rénovation thermique des bâtiments dues à différents programmes déployés par la région depuis 2005 (Degremont, 2018).

En termes d'énergie consommée, on constate une réduction de la consommation des produits pétroliers d'environ 35 % et d'électricité de 2 %. Cette réduction est due à la baisse de la demande de chauffage de 24 % (18,25 PJ), tous les autres postes de consommation ayant augmenté. Les départements qui ont contribué le plus à cette réduction sont les Bouches-du-Rhône (-7.30 PJ), les Alpes-Maritimes et le Var (environ -4 PJ chacun).

4.2.5. Le secteur tertiaire

Le secteur tertiaire ne représente que 14 % des usages énergétiques de la région SUD PACA, demande qui est satisfaite à 62 % par l'électricité, à 31 % par le gaz naturel et à 7 % par des produits pétroliers.

Les principaux usages énergétiques de ce secteur sont les besoins en chaleur (chauffage et eau chaude) qui comptent pour 35 % des besoins énergétiques, les usages divers d'électricité à 19 % et les autres usages énergétiques représentant 22 %. La climatisation devient de plus en plus présente et compte aujourd'hui pour 11 % de la demande du secteur.

Les principales branches de consommation du secteur sont les bureaux avec une demande qui représente 28 %, suivies par les commerces (20 %), le tourisme (16 %), les secteurs de la santé, de la recherche et de l'enseignement (chacun comptant pour 12 %). Les autres branches de consommation comptent ensemble pour 12 % (éclairage public, sport, culture, organismes de transport et habitat communautaire). Le chauffage est un des principaux postes de consommation d'énergie finale dans les branches de l'enseignement et recherche, habitat communautaire et santé et action sociale. Dans les bureaux, nous pouvons constater que la climatisation et le chauffage comptent chacun pour 26 % de la consommation d'énergie finale. Enfin, la cuisson est le poste de consommation énergétique le plus important de la branche du tourisme et l'eau chaude sanitaire est celui de la branche sport, culture et loisirs.

Le département des Bouches-du-Rhône représente 43 % des besoins énergétiques régionaux du secteur tertiaire, suivi par les Alpes-Maritimes avec 24 % et le Var (16 %). Les bureaux sont responsables d'une large partie de la consommation dans tous les départements sauf dans les Hautes-Alpes où la branche café-hôtels-restaurants (tourisme) est la plus consommatrice d'énergie finale et représentent (31 %) de la demande du secteur dans le département. Il en est de même dans le Vaucluse où la branche du commerce compte pour 27 % de la consommation totale du secteur dans ce département.

Sur la période 2007-2017, la consommation d'énergie finale du secteur tertiaire est restée stable, avec une croissance de 0,3 % pour la région²⁶ mais cette évolution n'a pas été suivie de la même façon pour chacune des branches du secteur (Tableau 10). Ainsi, la consommation d'énergie finale a bien

²⁶ Les Bouches-du-Rhône et le Var ont vu leur consommation augmenter de 3 % et 2 % respectivement.

augmenté pour les branches du commerce, enseignement et recherche, habitat communautaire, santé et action sociale, et tourisme. On observe une réduction pour toutes les autres branches. Entre 2012 et 2017 par contre, cette consommation a augmenté de 7 %, en grande partie en raison de l'évolution des consommations énergétiques dans la branche du commerce, alors même que celles des bureaux ont plutôt connu une baisse de la consommation.

	2007 - 2017		2012 - 2017		Moyenne
	%	PJ	%	PJ	
Bureaux	-18 %	(4.24)	-6 %	(1.18)	-1 %
Autres	-10 %	(1.78)	3 %	0.44	1 %
Chauffage	-41 %	(2.22)	-30 %	(1.40)	-6 %
Cuisson	-25 %	(0.09)	-20 %	(0.07)	-4 %
Eau chaude sanitaire	-24 %	(0.15)	-24 %	(0.15)	-5 %
Commerces	42%	4.22	36%	3.73	6 %
Autres	41 %	2.94	35 %	2.59	6 %
Chauffage	37 %	0.70	36 %	0.69	7 %
Cuisson	68 %	0.18	44 %	0.14	8 %
Eau chaude sanitaire	60 %	0.40	41 %	0.31	7 %
Enseignement - Recherche	50 %	2.59	39 %	2.19	8 %
Autres	69 %	0.75	48 %	0.59	8 %
Chauffage	45 %	1.12	30 %	0.83	7 %
Cuisson	30 %	0.20	55 %	0.30	9 %
Eau chaude sanitaire	54 %	0.52	47 %	0.47	8 %
Habitat communautaire	4 %	0.13	5 %	0.16	1 %
Autres	4 %	0.03	0 %	0.00	0 %
Chauffage	5 %	0.06	1 %	0.02	2 %
Cuisson	11 %	0.06	14 %	0.07	3 %
Eau chaude sanitaire	-3 %	(0.03)	8 %	0.06	2 %
Organismes de transports	-50 %	(0.90)	-40 %	(0.59)	-9 %
Autres	-60 %	(0.69)	-49 %	(0.45)	-13 %
Chauffage	-39 %	(0.16)	-24 %	(0.08)	-4 %
Cuisson	20 %	0.01	-4 %	(0.00)	0 %
Eau chaude sanitaire	-40 %	(0.07)	-36 %	(0.06)	-9 %
Santé et action sociale	6 %	0.51	12 %	0.88	3 %
Autres	11%	0.27	12 %	0.30	2 %
Chauffage	-1%	(0.04)	8 %	0.22	3 %
Cuisson	2%	0.01	17 %	0.07	4 %
Eau chaude sanitaire	15%	0.26	17 %	0.28	4 %
Sport culture	-37%	(1.49)	-21 %	(0.66)	-4 %
Autres	-6 %	(0.07)	10 %	0.10	2 %
Chauffage	-49 %	(0.59)	-40 %	(0.41)	-9 %
Cuisson	-44 %	(0.06)	-32 %	(0.04)	-7 %
Eau chaude sanitaire	-49 %	(0.77)	-28 %	(0.31)	-6 %
Tourisme	-3 %	(0.36)	3 %	0.30	1 %
Autres	8 %	0.27	6 %	0.21	1 %
Chauffage	-17 %	(0.44)	-9 %	(0.21)	0 %
Cuisson	-11 %	(0.44)	8 %	0.26	2 %
Eau chaude sanitaire	15 %	0.25	1 %	0.03	0 %
Total	0,3 %	0.23	7 %	4.84	2 %

Tableau 10 : Évolution de la consommation dans le secteur tertiaire par besoin énergétique

4.2.6. L'agriculture

L'agriculture ne représente que 1 % de l'énergie consommée dans la région. 27 % de cette consommation se situe dans les Bouches-du-Rhône, 26 % dans le Vaucluse et 20 % dans le Var. La demande de ce secteur est satisfaite à 45 % par des produits pétroliers, à 31 % par l'électricité et à 24 % par le gaz naturel. La demande de ce secteur est 15 % plus haute en 2017 qu'en 2007.

4.2.7. Production

En 2017, la région SUD PACA ne produit que 17 % (89 PJ) de sa consommation totale d'énergie (509 PJ) sous forme d'énergie thermique (17 % de la production) et d'électricité (83 % de la production), tel que présenté dans la Figure 11. Même si la région ne possède pas de ressources primaires fossiles dans son territoire, 39 % de la production totale d'énergie régionale provient de la combustion du gaz naturel et 2 % de l'usage des produits pétroliers, ressources primaires fossiles importées par la région (en dehors des 1 PJ de gaz renouvelable produit localement). Elle provient également de ressources renouvelables, la région SUD PACA étant d'ailleurs la troisième région de France en termes de production solaire et quatrième en termes de production hydraulique. Cette ressource hydraulique couvre 32 % de la production totale d'énergie de la région, la biomasse 13 % et la production solaire 7 %. En termes de production d'électricité, 45 % de cette production provient de la combustion du gaz naturel, 39 % de l'énergie cinétique de l'eau et 39 % de l'irradiation solaire.

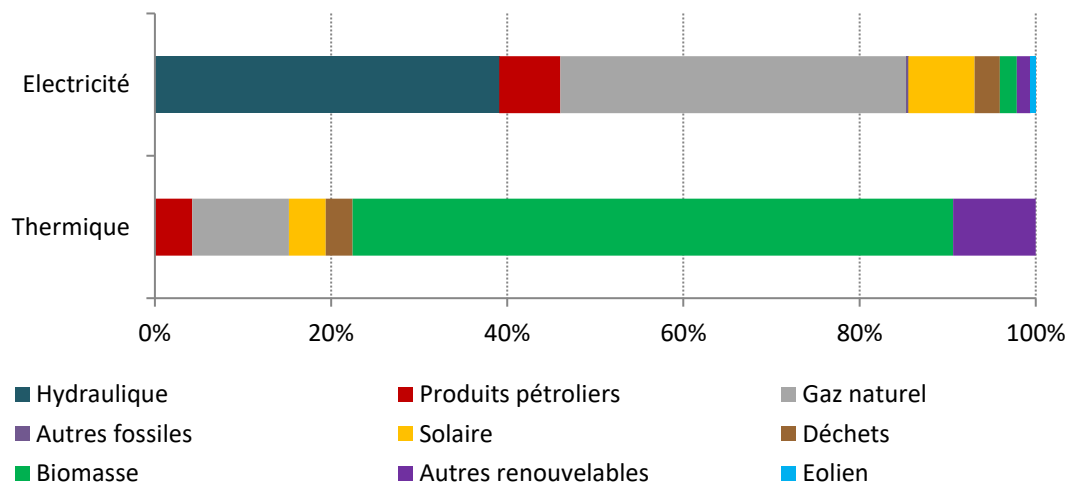


Figure 11 : Part des différents énergies dans la production d'énergie dans la région SUD PACA en 2017

La production énergétique est concentrée dans les Bouches-du-Rhône, à hauteur de 56 % (Figure 12), en raison de la proximité du port, d'un accès à l'eau douce et des principales industries, ce qui a poussé au développement des centrales thermiques. On trouve ensuite les Alpes-de-Haute-Provence et le Var qui disposent de larges disponibilités de ressources hydrauliques dans leurs territoires, chacun représentant 13 % de la production.

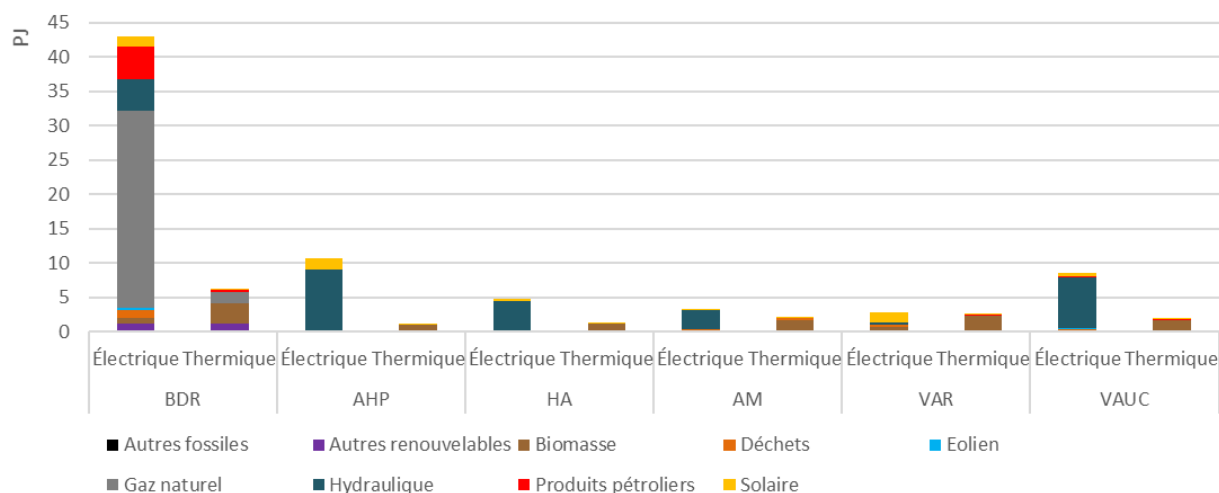


Figure 12 : Production énergétique par département et par type de production en 2017

La production d'énergie (électricité et chaleur) de la région SUD PACA est passée de 68 PJ en 2007 à 88 PJ en 2017, ce qui représente une croissance de 30 % (Figure 13) avec des variations selon les années, comme en 2010 qui affiche également une production locale de 88 PJ tandis que le niveau de 2014 est similaire à celui de 2007 (70 PJ). Ces changements de niveau de production s'expliquent principalement par les longues périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes et qui affectent directement la disponibilité des ressources hydrauliques. En dépit d'une augmentation de la puissance installée des centrales hydrauliques de l'ordre de 1 %, la production varie fortement et en 2017 la production reste plus faible que celle de 2007 de 1 %. De la même manière, malgré l'augmentation entre 2007 et 2017 de la puissance installée des centrales de production de chaleur et d'électricité de 35 % dans la région SUD PACA, la production totale d'énergie reste relativement stable. Il faut aussi noter qu'en 2016 est survenue une augmentation importante des capacités des centrales fossiles, notamment celles utilisant du gaz naturel.

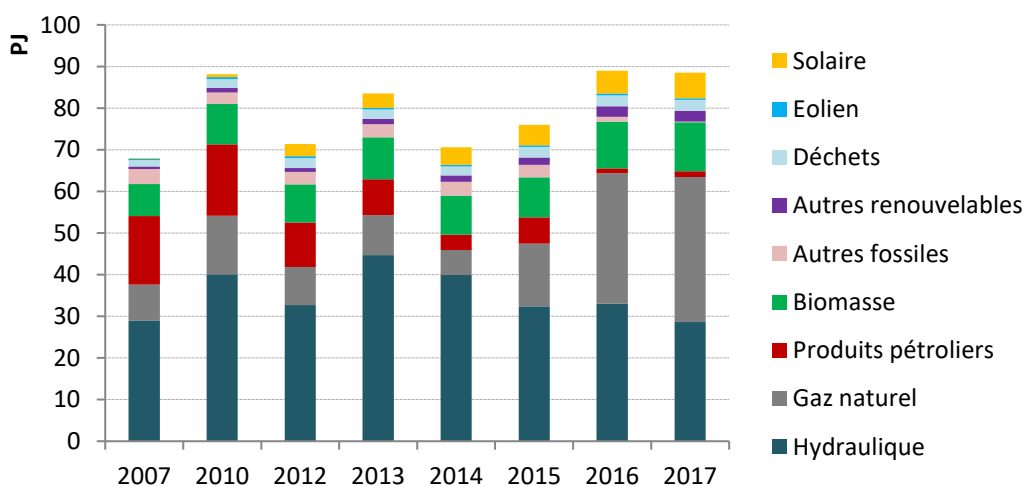


Figure 13 : Évolution des dix dernières années de la production énergétique de la région SUD PACA

Les principales augmentations de production énergétique proviennent des centrales au gaz naturel, avec une hausse d'environ 300 % en 2017 par rapport à 2007. Par contre, la production énergétique issue des produits pétroliers a été drastiquement réduite, d'environ 92 %. La production énergétique solaire a de son côté significativement augmenté, de 16 % en moyenne par an depuis 2012 (Figure 14), en particulier grâce aux nouvelles installations solaires photovoltaïques au sol, dont le développement

de puissance a crû d'environ 12 % chaque année depuis 2012. Le département qui présente la production solaire photovoltaïque la plus élevée est les Alpes-de-Haute-Provence, suivi par les Bouches-du-Rhône puis le Var.

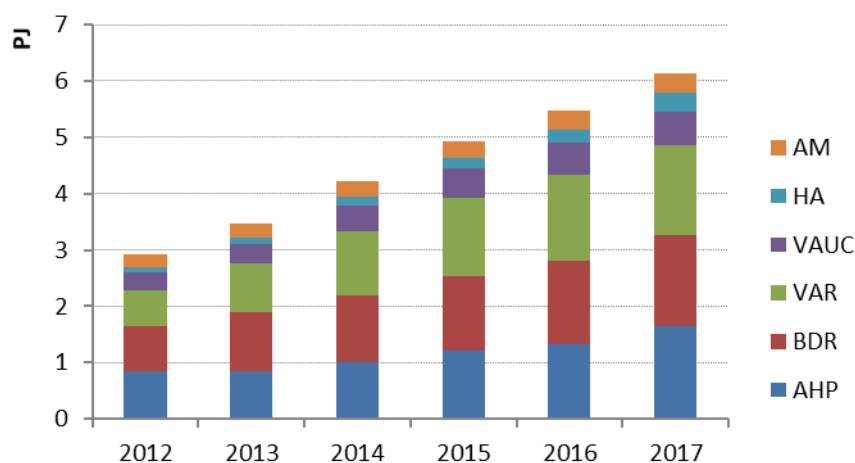


Figure 14 : Production électrique solaire par département depuis 2012

Dans cette section, nous avons relevé l'évolution contrastée de la consommation énergétique de différents secteurs de consommations et des divers postes de consommation du système énergétique de chaque territoire de la région SUD PACA. D'abord, nous pouvons constater les dix dernières années, une diminution de la consommation des produits pétroliers mais une augmentation de la consommation du gaz naturel, tandis que la part de l'électricité est restée constante. Nous avons également indiqué la concentration de la consommation dans les départements du littoral, BDR, AM et VAR, qui représentent environ 85 % de la consommation énergétique de la région. Cette consommation est notamment concentrée dans BDR qui présente une importante activité industrielle, dont la consommation d'énergie finale a augmenté singulièrement entre 2017 et 2010 après avoir connu une chute de la consommation entre 2007 et 2010 suite à la fermeture de deux sites importants de consommation.

Quant au secteur résidentiel, la consommation du secteur a diminué ces dernières années en raison principalement de la réduction de la consommation du chauffage, même si on observe une augmentation de la consommation énergétique de tous les autres postes de consommation du secteur. Le secteur tertiaire pour sa part montre une évolution très hétérogène selon chaque branche d'activité, avec notamment la branche des bureaux qui enregistre une réduction de sa consommation énergétique et le secteur du commerce qui montre une augmentation de sa consommation finale d'énergie. Enfin, dans le secteur du transport, l'influence sur la consommation énergétique du secteur des véhicules particuliers et de poids lourds a pu être soulignée. En termes de production énergétique, nous avons montré qu'il existe une concentration de la production dans les BDR, et de manière générale, nous avons souligné la croissance importante de la production solaire ainsi qu'une utilisation importante du gaz naturel les dernières années pour la production énergétique dans la région.

De cette façon, l'évolution du système énergétique régional à l'avenir présente beaucoup de questions, en particulier comment contribuer à réduire la consommation d'énergies fossiles avec l'utilisation d'énergies renouvelables dans tous les secteurs de consommation de la région.

Notamment comment permettre une introduction plus importante de la production électrique régionale provenant des énergies renouvelables, principalement des ressources solaires dont la production est dépendante des conditions météorologiques, dans la consommation finale d'énergie. En particulier, quelle énergie développer et pour quel poste de consommation, et dans quels territoires développer la production d'énergies renouvelables.

Ainsi, pour répondre aux différents enjeux énergétiques de la région, nous avons construit un outil de modélisation énergétique qui permet de représenter le système énergétique régional et avec lequel nous pourrions analyser, à l'aide de différents scénarios d'offre et de demande, la transition vers un système faible en carbone de la région, en intégrant aussi une perspective d'économie circulaire. Dans les sections suivantes, nous présenterons comment nous avons procédé à la construction de cet outil.

4.3. Un modèle d'aide à la décision développé pour la stratégie de transition énergétique et d'économie circulaire de la région SUD PACA : TIMES SUD PACA

4.3.1. Caractéristiques générales du modèle TIMES SUD PACA

Comme les autres modèles de la famille TIMES, TIMES SUD PACA repose sur un programme d'optimisation linéaire qui vise à produire un système énergétique, à moindre coût, suivant un certain nombre de contraintes d'ordre technique, économique, environnementale (etc.) fixées par l'utilisateur, sur un horizon de moyen et long terme. Il combine ainsi deux approches de modélisation des systèmes énergétiques : technique et économique. Le modèle TIMES SUD PACA représente en détail tout le système d'offre d'énergie de la région, autrement dit toutes les ressources énergétiques pouvant être exploitées sur le territoire de la région SUD PACA (potentiels d'énergies renouvelables) auxquelles s'ajoutent les ressources importées. Sur la base de ces ressources disponibles sont associées de nombreuses technologies dans la mesure où ces ressources sont ensuite transformées, transportées, distribuées et enfin utilisées pour satisfaire la demande finale de services énergétiques. Le système énergétique de la région SUD PACA représente ainsi cet ensemble de technologies et de ressources qui forment une chaîne complète. Il peut également recourir aux réseaux gazier et électrique nationaux pour s'approvisionner en énergie quand nécessaire. Dans les sections suivantes, nous détaillons les étapes que nous avons suivies pour la construction du modèle.

Pour la représentation du système de production d'électricité, de chaleur et de demande, nous avons pris comme référence le modèle TIMES-France développé par (Assoumou, 2006) et (Millot, 2020), tandis que pour la représentation du système de production *power-to-gas* nous avons utilisé comme référence le modèle TIMES-FR-GAZEL (Doudard, 2019) et le modèle développé par le *Joint Research Center* (JRC) de l'Union européenne (Sgobbi et al., 2016). Une représentation du RES simplifié de la région SUD PACA est donnée dans la Figure 15.

De cette façon, comme présenté précédemment, le RES identifie d'abord les ressources énergétiques primaires (potentiels d'énergies renouvelables, importations et exportations) disponibles pour être transformées pour produire des énergies secondaires (l'électricité, la chaleur, l'hydrogène, etc.). Ensuite, le RES permet d'identifier comment ces énergies peuvent être transportées et distribuées, donnant comme résultat l'énergie finale qui sera postérieurement utilisée par les technologies de demande qui couvrir la demande finale de services énergétiques. Pour chaque processus de

transformation, transport et production, sont détaillées les différentes caractéristiques technico-économiques (facteur d'activité, rendements, cout d'investissement, cout variables et fixes, etc.).

Le modèle TIMES SUD PACA repose sur un découpage temporel de 12 *timeslices* représentant les 4 saisons et une journée découpée en tranches horaires (matin 13 heures, pic 1 heure, nuit 10 heures). L'horizon temporel est 2050 et l'année de référence 2017.

Le modèle n'inclut pas d'externalités négatives associées au développement du système énergétique, comme par exemple les émissions de gaz à effet de serre issues de la construction des technologies de production. Le taux d'actualisation que nous retenons pour le modèle est de 4 % correspondant au taux choisi par les décideurs publics. Il pourra être soumis à des variations (analyses de sensibilité) pour étudier son impact sur l'évolution du système. Les prix des combustibles importés sont issus du scénario de référence 2016 de la Commission européenne (European Commission, 2016).

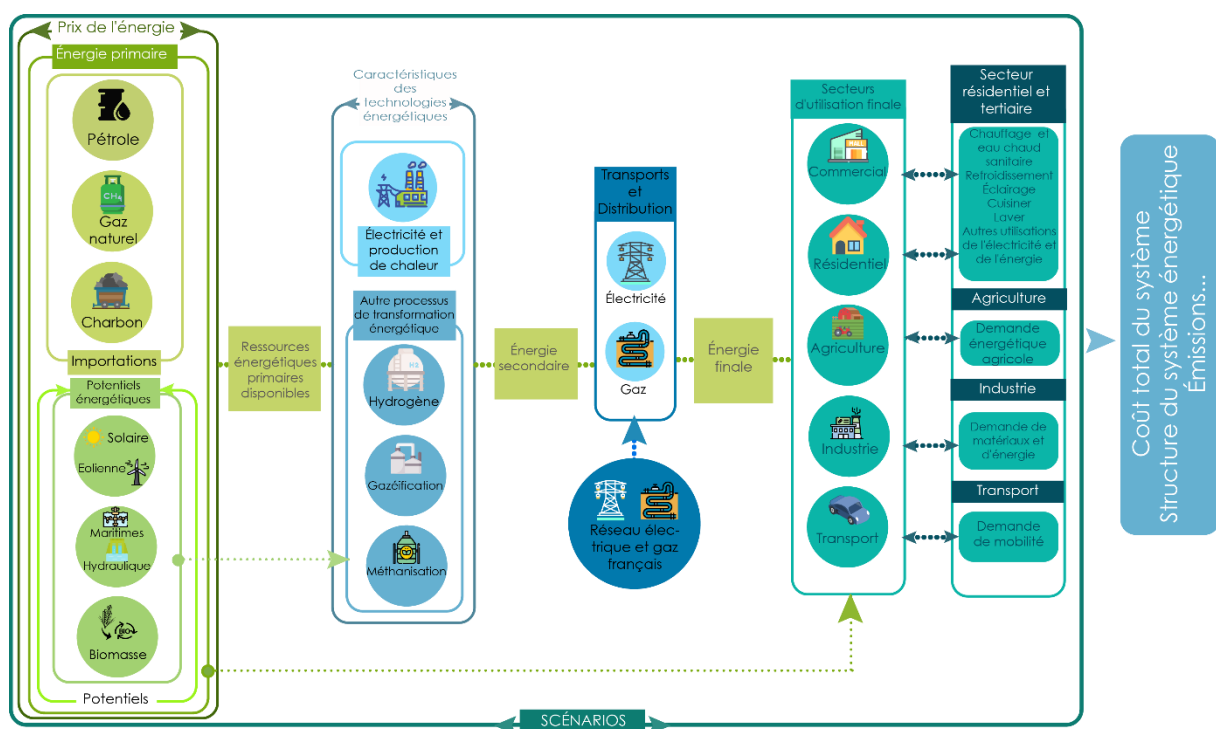


Figure 15 : Système énergétique de référence simplifié de la région SUD PACA

Les données de consommation, de production et d'échange d'énergie utilisées pour le calibrage du modèle et notamment de l'année de référence proviennent de nombreux travaux de recherche et d'échanges avec différents acteurs travaillant sur des problématiques liées aux systèmes énergétiques des régions françaises et plus particulièrement de la région SUD PACA. Ce travail de collecte de données a constitué une partie importante et essentielle des travaux menés pendant la préparation de cette thèse. Nous avons en particulier collaboré avec AtmoSud, qui est l'organisation agréée par le Ministère en charge de l'Environnement pour le suivi de la qualité de l'air de la région SUD PACA. Dans le cadre de leur travail, AtmoSud construit une base de données issue de la collaboration avec différents acteurs régionaux et nationaux. Leur base de données détaille la production par filière et la consommation énergétique par secteur de consommation et par type d'énergie au niveau communal, ainsi que les émissions de polluants atmosphériques. AtmoSud met ces données à disposition dans la plateforme CIGALE, avec cependant quelques restrictions d'accès puisque certaines données sont

soumises au secret statistique, notamment en ce qui concerne les consommations industrielles. Après signature d'un accord de confidentialité pour la non-diffusion des données, les données sollicitées ont pu nous être fournies, ce qui nous a permis une construction plus pertinente du système énergétique de référence pour chacune de nos zones d'étude.

Comme précisé dans le panorama énergétique de la région, la consommation énergétique de la région SUD PACA se concentre dans les zones littorales où se trouvent la plupart de la population ainsi qu'une grande partie des activités économiques. Pour mieux intégrer les caractéristiques énergétiques de la région dans notre modèle de prospective, celle-ci est donc découpée en neuf zones. Les départements présentant une forte concentration de leurs activités et de la population sur le littoral sont séparés en deux zones, une à haute consommation correspondant à la côte et l'autre pour les parties plus éloignées de la mer. Aux trois départements Hautes-Alpes (HA), Alpes-de-Haute-Provence (AHP) et Vaucluse (VAUC), on ajoute donc les zones à forte consommation des Bouches-du-Rhône (BDR1), des Alpes-Maritimes (AM1) et du Var (VAR1), et les zones à faible consommation des mêmes départements, respectivement BDR2, AM2 et VAR2. On notera que les zones à haute consommation représentent près de 80 % de la consommation de la région SUD PACA (Figure 16).

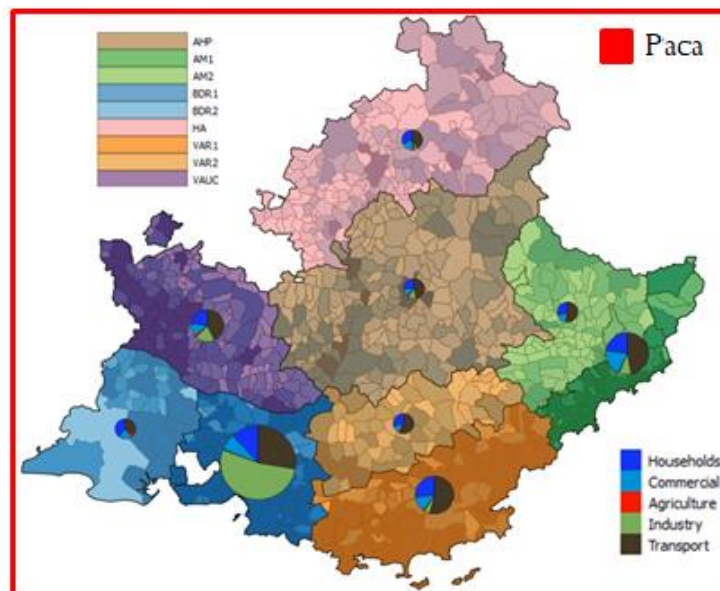


Figure 16 : Découpage du territoire de la région SUD PACA en neuf zones pour la modélisation

Une dixième zone « fictive » est aussi implémentée et appelée « PACA ». L'intégration de cette zone dans notre modèle répond au besoin de représenter les réseaux gazier et électrique, pour permettre aux neuf autres zones d'utiliser l'électricité provenant des réseaux, de vendre leur production électrique ou d'en acheter. Ces échanges sont calibrés pour l'année de base. Une autre fonction de cette zone « PACA » est de représenter les consommations sur lesquelles les politiques énergétiques de la région SUD PACA n'ont pas d'influence directe. En premier lieu, cela s'applique par exemple aux activités des raffineries, car ce secteur est stratégique dans l'approvisionnement énergétique de la France toute entière et il reste donc un peu à la marge des politiques régionales. En second lieu, c'est le cas pour les consommations des véhicules (véhicules particuliers, utilitaires et poids lourds) et du secteur aérien qui passent par la région mais qui viennent du reste de la France ou de l'étranger. Pour les véhicules particuliers, nous avons établi que 15 % correspondent aux véhicules qui proviennent de l'extérieur de la région SUD PACA (7 % étrangers, 9 % autres régions). Pour les poids lourds, 22 % des

consommations énergétiques correspondent aux transports des marchandises entrant et sortant de la région SUD PACA (L'Observatoire Régionale des Transports, 2016). Les consommations de l'aviation sont quant à elles modélisées dans leur globalité au niveau de la zone PACA.

4.2.2. Modélisation du système de demandes de services énergétiques

La demande constitue un élément essentiel dans le modèle car elle qui va guider les choix d'investissements du modèle²⁷. Plus la demande est détaillée, plus il sera possible d'intégrer des caractéristiques spécifiques à chaque mode de consommation et à chaque zone d'étude et ainsi d'avoir une analyse plus approfondie des options de décarbonation, car il est possible de mieux repérer quelle technologie de demande développer et quelle énergie utiliser, et pour quel usage, ce qui donne plus d'options pour la substitution des énergies fossiles. Dans les modèles TIMES, la demande est exogène, c'est-à-dire que le modélisateur doit construire la demande et la renseigner dans le modèle. Ainsi, dans cette section, nous allons détailler comment nous avons procédé pour la construction de la demande à l'horizon 2050 que nous avons utilisée pour le modèle TIMES SUD PACA.

4.2.2.1 Secteurs résidentiel et tertiaire

La demande de services énergétiques pour les secteurs résidentiel et tertiaire est détaillée selon le chauffage, la cuisson, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, le lavage, le froid, la climatisation, les autres usages énergétiques et les autres usages électriques, ainsi que par type d'énergie consommé. Le taux d'équipement des ménages suit les statistiques issues de l'enquête Budget des familles de 2011 de l'INSEE car elle détaille les données par zone urbaine et rurale, à la différence des données plus récentes. Le nombre de ménages (en unités) pour l'année de base est issu du recensement de la population réalisé par l'INSEE en 2017. Pour transformer les unités en GW, nous suivons la formule suivante :

$$S = VPU * \left(\frac{U}{FA}\right) * \left(\frac{1}{C2A}\right)$$

$$VPU = EFF * EF * \frac{1}{U}$$

avec

- S : Stock (GW) ;
- VPU : Valeur délivrée par unité (PJ/U) ;
- U : Unités ;
- FA : Facteur d'activité ;
- $C2A$: Capacité à activité. Permet la conversion entre la capacité de processus et les unités d'activité. Le coefficient utilisé est de 31,536 PJ / GW ;
- EFF : Efficacité du processus ;
- EF : Energie finale consommée par la technologie de demande (PJ).

Les données d'AtmoSud qui ont également servi au calibrage des demandes ne spécifient pas directement la consommation associée à la climatisation dans le secteur résidentiel, celle-ci est

²⁷ On parle ainsi de modèle « déterminé par la demande » (*demand-driven model*)

intégrée dans les autres usages électriques. Pour l'estimer, nous avons donc suivi les spécifications établies dans le cadre du SRCAE (Région Provence-Alpes-Cote d'Azur, 2013b) selon lesquelles la consommation de la climatisation doit correspondre à environ 4 % de la consommation énergétique du secteur résidentiel. Nous avons ainsi réduit ces 4 % de la consommation des autres usages électriques pour éviter le double comptage.

Les données de production énergétique provenant d'AtmoSud détaillent la production des pompes à chaleur (PAC) et des systèmes solaires thermiques mais ne donnent pas d'information sur la demande satisfaite par cette production. Pour établir une relation offre-demande dans le modèle TIMES SUD PACA pour les PAC, nous avons alors d'abord pris comme référence le nombre de PAC installées en 2014 (Région SUD, 2018a), auquel nous avons additionné 10 % des ventes nationales de PAC pour 2015 et 2016, et 20 % pour 2017 ce qui correspond aux chiffres détaillés dans (Observ'ER-Observatoire des énergies renouvelables, 2020). La définition de la production provenant des PAC suit la méthodologie proposée par (Région SUD, 2018a) avec un facteur d'activité de 2 600 heures.

Dans le cas des systèmes solaires thermiques, nous avons utilisé les données de production de la part d'AtmoSud comme base. Le calcul du stock existant suit la formule suivante :

$$S = \frac{P}{FA * C2A}$$

Avec P la production.

Les principales caractéristiques des technologies proviennent du modèle TIMES-France (Millot, 2020) ; elles sont détaillées ci-dessous.

	Technologie	Energie utilisée	Efficacité (%)	Capacité installée (GW)	Durée de vie (années)
Chauffage	Chaudière	Biomasse	0.7	0.73	10
	Échangeur	Chaleur de réseau	0.9	0.12	60
	Convecteur	Electricité	0.9	0.65	10
	Chaudière	Fioul domestique	0.8	0.75	10
	Chaudière	GPL	0.75	0.18	10
	Chaudière	Gaz naturel	0.78	1.29	10
	Collecteur	Solaire	0.91	0.02	10
	Échangeur	Géothermie	0.93	0.17	10
	PAC	Pompe à chaleur	3	0.46	10
Réfrigération (unités)	Réfrigérateur	Electricité	1	1.02	10
ECS	PAC	Pompe à chaleur	1	0.23	10
	Chauffe-eau	Electricité	0.95	1.42	10
	PAC	Géothermie	1	0.04	10
	Fourneau	GPL	0.9	0.02	10
		Gaz naturel	0.73	0.59	10
		Solaire	0.95	0.05	10
Cuisson	Electricité	1	0.98	15	
	GPL	1	0.004	15	
	Gaz naturel	1	0.79	15	

Tableau 11 : Caractéristiques des technologies de demandes pour le secteur résidentiel

Pour modéliser les autres usages électriques, nous considérons que chaque logement représente une unité de consommation (le stock ici est représenté en unités) et nous considérons la formule suivante pour déterminer ce que chaque unité peut produire, avec un facteur d'activité de 1 :

$$C2A = EFF * \left(\frac{EF}{FA}\right)$$

Une logique similaire s'applique pour la modélisation des autres usages énergétiques, à la différence que seules 10 % des maisons sont équipées en appareils.

La demande du secteur tertiaire est détaillée par branche : Bureaux, Cafés-Hôtels-Restaurants, Commerces, Enseignement-Recherche, Habitat-Communautaire, Organismes-de-transport, Santé-et-action-sociale, Sport-Culture-Loisirs avec leurs demandes respectives de services énergétiques. La consommation d'autres usages énergétiques et électriques de ce secteur est modélisée selon un process *input-output*, c'est-à-dire que pour produire une unité de demande, une certaine quantité d'énergie est consommée (Figure 17).

Base-year technologies for commercial - Other energy				
TechName	Comm-IN	~FI_T		Output
		Comm-OUT	Input	
\ : Unit				
COTHNRGB00	COMBIO		0.00066642	
	COMGAS		0.0086635	
	COMELEC		0.99067008	
		COTHNRGB		1

Figure 17 : Exemple de modélisation pour la consommation des autres usages énergétiques et électriques

Enfin, la consommation de l'éclairage public est intégrée dans le secteur tertiaire. Pour déterminer les points lumineux de chaque zone, nous avons suivi l'étude (CEREMA, 2016).

4.2.2.2. Secteur du transport

Le secteur du transport représente la consommation énergétique nécessaire pour satisfaire la demande de mobilité. Dans ce secteur, sont représentés les véhicules particuliers, les bus, et les motos – dont la demande est en passagers/kilomètres –, et les poids lourds et les véhicules utilitaires – dont la demande est en tonnes/kilomètres. A l'instar du secteur de l'habitat, la représentation du secteur du transport repose sur les caractéristiques techniques des technologies du modèle TIMES-France (Millot, 2020) détaillées dans le Tableau 12.

AtmoSud fait une distinction pour le secteur du transport entre la consommation énergétique sur les routes, autoroutes et en ville suivant la méthodologie du (Citepa, 2020), qui indique que cette différenciation suit les vitesses sur les différents réseaux de circulation ; ce qui permet de refléter de meilleure façon la circulation en France. Dans le cadre de notre modèle, les consommations *route* et *autoroute* sont intégrées dans les consommations de longue distance, tandis que les consommations *villes* sont représentées dans les courtes distances. En outre, les biocarburants sont incorporés directement dans les véhicules (7,7 % pour les véhicules à essence et 9,6 % pour les véhicules à diesel), cette répartition pouvant évoluer en fonction des scénarios à analyser.

Type de véhicule	Type d'énergie consommée	Stock	Efficacité (MPKms/PJ)		Remplissage des véhicules	Durée de vie
			Courte distance	Longue distance		
Véhicules particuliers	Electrique	10,408	1,290	1,569	1.2 Passagers/véhicule	10
	Essence	955,471	340	415		
	GPL	17,573	340	415		
	Diesel	1,841,766	402	460		
	GNV	400	340	415		
Bus	Diesel	7,006	42.88	53.6	16 Passagers/véhicule	15
	Gaz naturel	208	39	49		
Poids lourds	Diesel	54,324	67	83	10 tonnes/véhicule	10
Véhicules utilitaires	Diesel	678,557	479		3 tonnes/véhicule	15
	Essence	57,805	405			

Tableau 12 : Principales caractéristiques techniques des technologies du secteur du transport.

La modélisation des véhicules particuliers neufs permet une distinction entre gammes de véhicules, inférieure, moyenne inférieure, moyenne supérieure et gamme supérieure. La part de chaque gamme dans le modèle suit les statistiques de (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles, 2017) :

Type de gamme	%
Gamme économique et inférieure	52 %
Gamme moyenne inférieure	28 %
Gamme moyenne supérieure	13 %
Gamme supérieure	7 %

Tableau 13 : Part de chaque véhicule particulier neuf par gamme

Les véhicules particuliers neufs sont aussi classés selon la distance qu'ils peuvent parcourir entre distance 1 (D1) et distance 2 (D2). Les véhicules D1 peuvent parcourir les kilomètres par an suivant les données renseignées par AtmoSud et qui ont été utilisée pour la calibration de l'année de base. Ces kilomètres parcourus sont distingués par zone d'étude, ils sont détaillés dans le Tableau 14.

km/an	AHP	HA	AM1	AM2	BDR1	BDR2	VAR1	VAR2	VAUC
Autres véhicules	12 578	9 707	8 751	8 016	9 709	9 174	12 395	11 643	10 266
Véhicules à diesel	18 567	17 184	12 323	13 234	13 626	12 704	14 183	14 563	14 271

Tableau 14 : Distance parcourue par les véhicules de D1

Nous pouvons observer la préférence pour utiliser les véhicules à diesel. En 2050, la disponibilité des carburants pour la consommation dans le secteur des transports sera beaucoup plus variée qu'aujourd'hui puisqu'elle inclura différentes autres énergies telles que le gaz, l'hydrogène et l'électricité. Par conséquent, nous considérons qu'à l'horizon 2050 les kilomètres parcourus par les différents véhicules pourraient évoluer en raison des nouveaux comportements en termes de conduite. La distance que les nouveaux véhicules particuliers pourront parcourir à l'horizon 2050 est détaillée dans le Tableau 15.

km/an		AHP	HA	AM1	AM2	BDR1	BDR2	VAR1	VAR2	VAUC
2017	Véhicules à diesel	12 578	9 707	8 751	8 016	9 709	9 174	12 395	11 643	10 266
	Autres	18 567	17 184	12 323	13 234	13 626	12 704	14 184	14 563	14 271
2025	Véhicules à diesel	13 246	10 505	9 154	8 583	10 152	9 574	12 606	11 981	10 719
	Autres	17 792	16 192	11 864	12 548	13 123	12 252	13 962	14 195	13 757
2030	Véhicules à diesel	13 682	11 037	9 416	8 957	10 438	9 832	12 740	12 197	11 013
	Autres	17 324	15 601	11 586	12 137	12 818	11 977	13 825	13 969	13 446
2040	Véhicules à diesel	14 597	12 182	9 961	9 756	11 036	10 371	13 012	12 642	11 624
	Autres	16 425	14 483	11 049	11 356	12 230	11 446	13 554	13 529	12 844
2050	Véhicules à diesel	15 572	13 446	10 537	10 625	11 668	10 939	13 289	13 103	12 268
	Autres	15 572	13 446	10 537	10 625	11 668	10 939	13 289	13 103	12 268

Tableau 15 : kilomètres parcourus par les véhicules de distance D2

Nous intégrons aussi une option dans le modèle pour l'utilisation des véhicules à mobilité individuelle (VMI). Les caractéristiques de ces véhicules sont détaillées à continuation :

Options	Vélos électriques				Vélos à hydrogène	Trottinette			
	1	2	3	4		1	2	3	4
Prix euros	1 199	1 599	1 999	3 199	4 000	315	300	850	3 700
Autonomie km	70	80	110	125	150	30	30	20	120
Puissance batterie Wh	576	504	600	540	748	500	500	500	2 100
MVkm/PJ	33 758	44 092	50 926	64 300	55 704	16,667	16,667	11,111	15,873
Km/an	2400					1440			

Tableau 16 : Caractéristiques technico économiques des véhicules à mobilité individuelle

Ainsi, ces VMI peuvent être utilisés pour remplacer les véhicules particuliers. Le service de mobilité offert par ces VMI peut être au maximum de 10 % pour la longue distance, et au minimum de 10 % de la courte distance. Par comparaison, le service de mobilité offert par les véhicules particuliers est d'au minimum 10 % de la courte distance et d'au minimum 10 % de la longue distance.

Enfin, les consommations émanant des secteurs aérien, maritime et ferroviaire sont détaillées par secteur d'énergie principalement en raison du fait que ces postes de consommation ne sont pas considérés comme influencés directement par les politiques régionales : les facteurs poussant la demande de ces secteurs sont plutôt externes qu'internes.

4.2.2.3. Secteur industriel

Le secteur de l'industrie est modélisé en représentant chacune des branches détaillées dans le panorama énergétique du secteur. Ce secteur suit, à l'instar des secteurs précédents, la méthodologie de modélisation du modèle TIMES-France. La demande finale pour l'industrie de la sidérurgie, de l'aluminium, du papier, de la chaux, du ciment et du verre est représentée par une demande de matériaux exprimée en tonnes (par exemple tonnes de papier). Le reste du secteur est modélisé comme une demande d'énergie.

La structure du modèle de production des matériaux est représentée de la façon suivante :

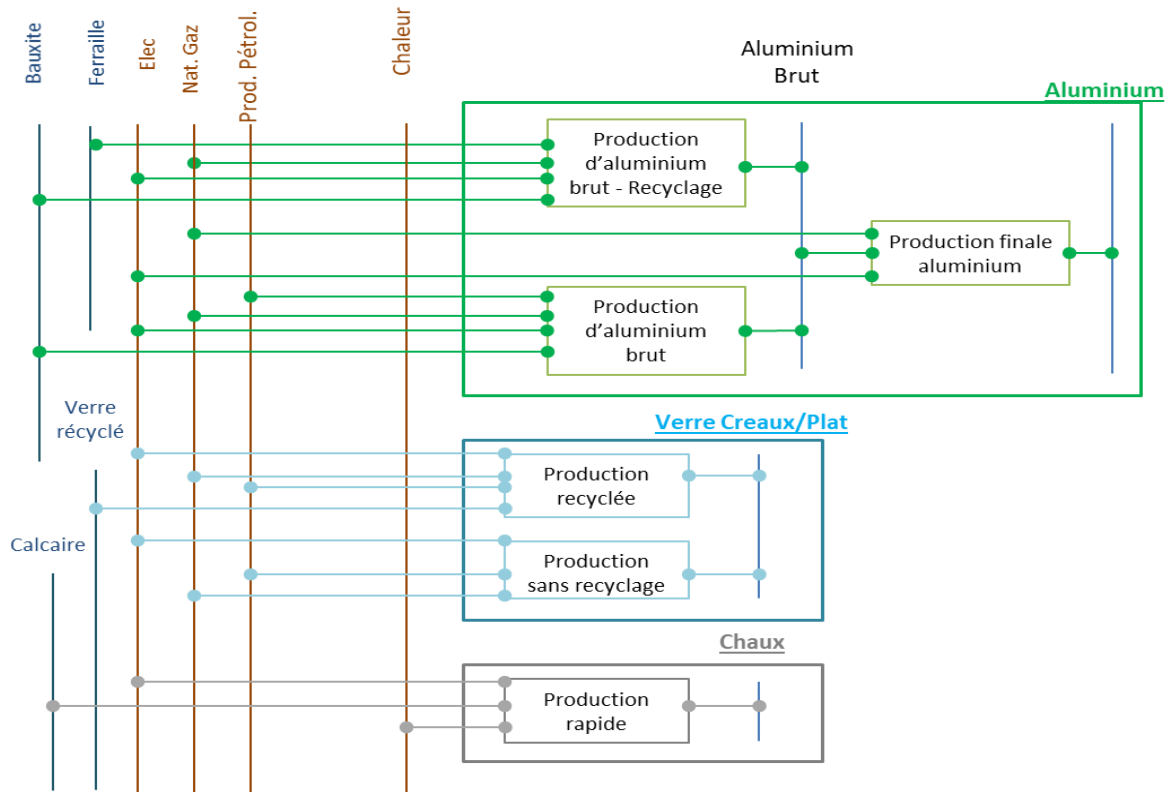


Figure 18 : Modélisation pour la production d'aluminium, du verre et du chaux

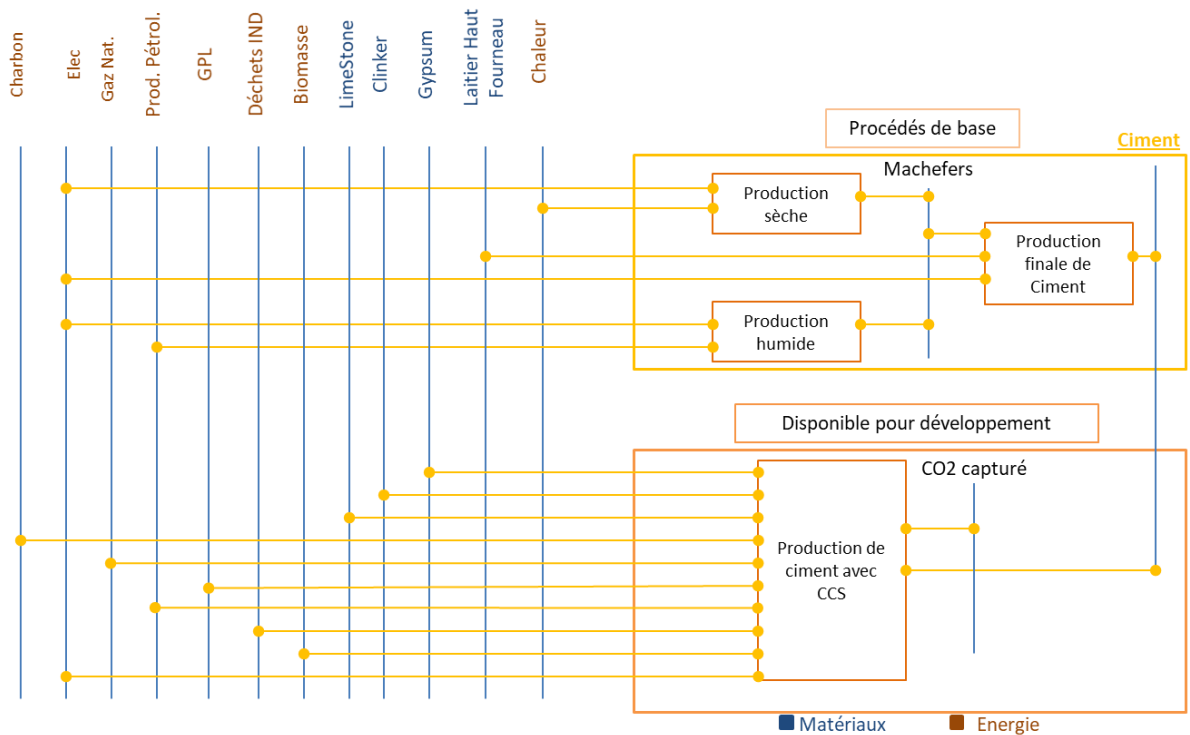


Figure 19 : Modélisation pour la production du ciment

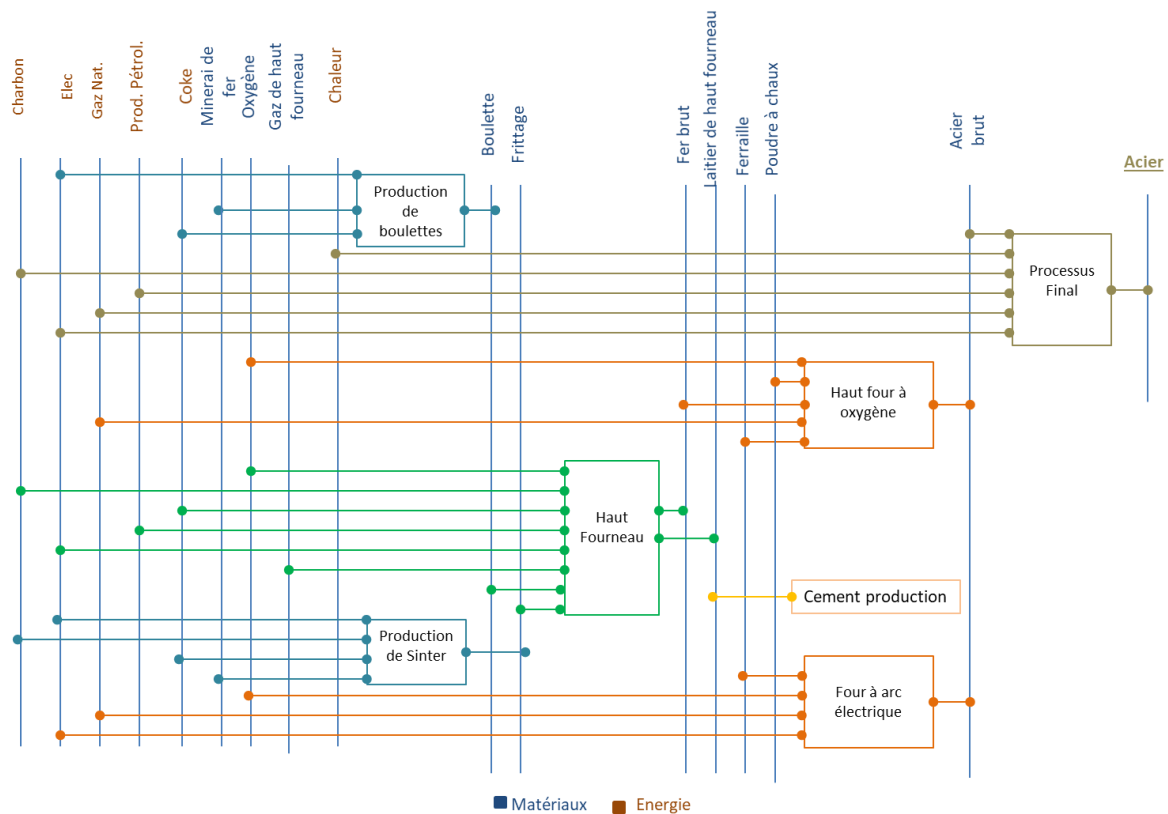


Figure 20 : Modélisation pour la production d'acier

4.2.2.4. Trajectoire de demande des différents secteurs sur la période

Secteur résidentiel

Pour tracer la trajectoire de la consommation énergétique de ce secteur, deux facteurs externes qui influencent directement le comportement de ce secteur ont été considérés : la population et la surface des bâtiments (en m²) du secteur de l'habitat, car ils sont les principaux déterminants qui ont tiré à la hausse la demande depuis plus de 20 ans (Carbone 4, 2014). L'évolution des logements à l'horizon 2030 est issue du scénario central de (INSEE, 2019) et, pour l'année 2050, nous suivons la tendance montrée dans l'étude (12 000 logements par an). Cette tendance est détaillée par zone d'emploi de la région SUD PACA (Figure 21), ce qui ne permet *a priori* pas d'identifier le besoin de logements pour certaines zones du modèle TIMES SUD PACA. La zone Nice et Cannes-Antibes couvrent les zones AM1 et AM2 du modèle et la zone Toulon couvre les zones VAR1 et VAR2. Pour décliner cette tendance, nous utilisons la part de logements de chaque zone en 2017 par rapport au nombre total de logements de chaque département. L'évolution de la population jusqu'à 2050 suit les estimations par an du scénario central réalisées par (INSEE, 2017). Elle est détaillée au niveau des départements : pour trouver la part de chaque zone d'étude du modèle, nous utilisons donc la part de la population dans chaque zone de l'année de base. Les évolutions ainsi obtenues sont détaillées dans le Tableau 17.

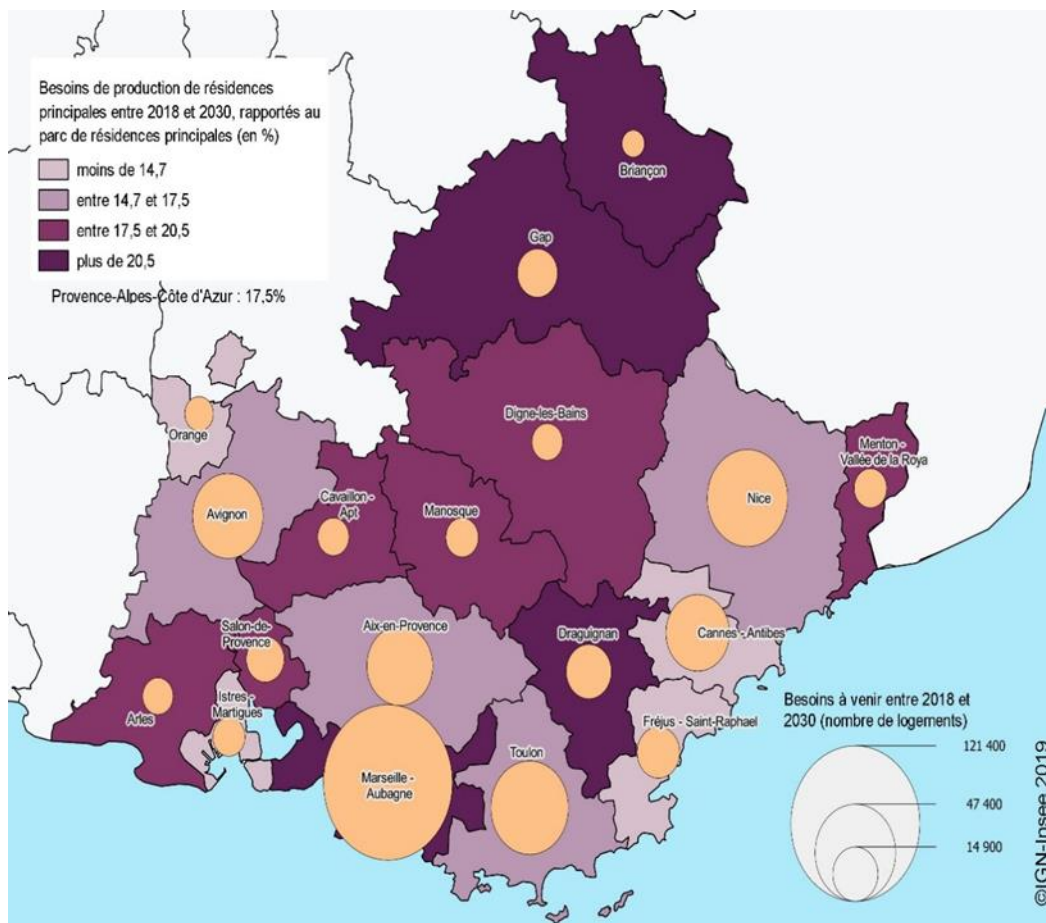


Figure 21 : Besoin de production de résidences principales entre 2018 et 2030 par zone d'emploi

	Nombre de logements				Population en milliers		
	2017	2030	2050	Nouveaux logements par an	2017	2030	2050
AHP	127 940	133 736	143 396	483	168	173	179
HA	135 493	142 693	154 693	600	146	151	160
AM1	713 115	730 983	760 763	1 489	1 039	1 041	1 058
AM2	53 632	54 952	57 152	110	59	59	60
BDR1	932 537	987 533	1 079 193	4 583	1 879	1 904	1 968
BDR2	88 689	91 581	96 401	241	169	172	177
VAR1	635 554	65 6914	692 514	1 780	941	953	990
VAR2	78 949	88 981	105 701	836	135	137	142
VAUC	301 947	325 047	363 547	1 925	571	575	593
Total région	3 067 857	3 212 421	3 453 361	12 047	5 107	5165	5327

Tableau 17 : Évolution du nombre des logements et de la population par zone d'étude de la région SUD PACA à l'horizon 2050

Pour déterminer l'évolution des besoins énergétiques dans le secteur résidentiel pour chaque poste de consommation, nous suivons une méthodologie similaire à celle utilisée pour tracer la demande à 2050 pour les différents scénarios dans l'étude des trajectoires du « Débat National sur la Transition Énergétique » (Carbone 4, 2014).

- **Le chauffage** : Pour identifier le besoin de chauffage des logements, nous utilisons le besoin thermique par m². Ce besoin dans l'année de base est issu du ratio entre la consommation de chaque zone et les m² pour chaque zone d'étude, il sera considéré comme constant pour les bâtiments existants tout au long de la période sauf rénovation énergétique des bâtiments. Cette rénovation suit différentes hypothèses pour chaque scénario analysé (voir chapitre suivant.) Pour les nouveaux bâtiments, la consommation thermique est de 12 kWh/m²/an selon la réglementation thermique de 2020 (Marcheteau, 2020). Les surfaces pour l'année de base ont été fournies par AtmoSud pour chacune des zones du modèle. Pour les bâtiments neufs, les surfaces moyennes sont 14 % plus petites que celles déjà présentes sur les territoires²⁸ selon les estimations de (Bien Estimer, 2018; SeLoger, 2017). La surface moyenne par logement neuf est détaillée dans le Tableau 18.

	Surfaces chauffées (m ²) 2017	Logements 2017	Surfaces par logement (m ²)	Surfaces logements neufs (m ²)
AHP	9 710 481	127 940	75.90	65.27
HA	9 679 793	135 493	71.44	61.44
AM1	52 601 666	713 115	73.76	63.44
AM2	3 878 409	53 632	72.31	62.19
BDR1	76 865 915	932 537	82.43	70.89
BDR2	8 691 969	88 689	98.01	84.28
VAR1	51 978 424	635 554	81.78	70.33
VAR2	7 348 532	78 949	93.08	80.05
VAUC	27 191 073	301 947	90.05	77.45

Tableau 18 : Surfaces moyennes de logements existants et neufs

- **L'ECS, autres usages électriques et autres usages énergétiques** : l'évolution de ces consommations est indexée sur la croissance annuelle de la population.
- **La cuisson, froid, lavage et éclairage** : sa croissance suit l'évolution du nombre de logements par an.
- **La climatisation** : multipliée par 4,5 en 2050 selon l'ADEME, cela signifie qu'environ 50 % des ménages seront équipés de climatiseurs en 2050 (contre 10 % en 2017), ces hypothèses s'appliquent particulièrement à la région SUD PACA.

Les consommations énergétiques de la région SUD PACA à l'horizon 2050 sont synthétisées dans le tableau suivant :

²⁸ Les surfaces moyennes des bâtiments existants pour la région SUD PACA selon (Bien Estimer, 2018; SeLoger, 2017) est de 75,5 m² et il est estimé que les surfaces des nouveaux logements sont de 65,1 m², soit 14 % moins spacieuses.

PJ	2017	2018	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Chauffage	41.31	41.29	41.27	41.17	41.06	40.95	40.85	40.74	40.64
Cuisson	11.26	11.31	11.36	11.59	11.82	12.05	12.27	12.50	12.73
Climatisation	9.95	10.41	11.41	14.33	17.99	22.60	28.38	35.65	44.77
ECS	22.34	22.40	22.51	22.77	23.01	23.23	23.43	23.59	23.73
Autres usages électriques	8.25	8.27	8.32	8.42	8.51	8.59	8.67	8.73	8.78
Eclairage	3.11	3.13	3.14	3.20	3.27	3.33	3.40	3.46	3.52
Autres usages énergétiques	0.62	0.62	0.62	0.63	0.64	0.64	0.65	0.65	0.66
Lavage	5.44	5.46	5.48	5.59	5.71	5.82	5.93	6.04	6.15
Froid	4.84	4.86	4.88	4.98	5.08	5.18	5.28	5.38	5.48
Total général	107.13	107.76	108.99	112.68	117.08	122.40	128.86	136.75	146.47

Tableau 19 : Évolution de la demande des services énergétiques du secteur résidentiel dans le scénario central

Pour tracer la trajectoire de la demande à l'horizon 2050, l'impact des nouvelles technologies n'est pas déterminé a priori dans la mesure où c'est le modèle qui calculera les technologies optimales à développer, sauf dans le cas où il existe des contraintes établies par l'utilisateur, lesquelles seront détaillées pour chaque scénario.

Secteur tertiaire

La projection de la demande de ce secteur est principalement liée à l'augmentation des surfaces tertiaires et ne prend pas en compte l'augmentation de la population ou d'autres facteurs économiques.

- Besoin de chauffage** : Le mode de calcul du besoin de chauffage de ce secteur est similaire à celui adopté pour le secteur résidentiel. Tout d'abord, pour déterminer les surfaces du secteur tertiaire par branche en 2017, nous avons utilisé comme base les surfaces en 2006 identifiées par l'étude (Energie Demain, 2011) auxquelles ont été ajoutées les surfaces commencées par branche depuis 2007 jusqu'à 2017, ces données étant issues des statistiques du (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2019a). Par conséquent, nous avons retenu 70 millions de m² pour 2017 et 71 millions de m² pour 2020. Ces résultats sont en cohérence avec les estimations de la région dans son SRCAE de 2013 où il a été estimé qu'il y avait 69 millions de m² en 2020. Pour déterminer les surfaces en 2050, nous avons utilisé comme base les estimations du SRCAE de la région SUD PACA, soit 76 millions de m² en 2050, auxquels nous ajoutons 4 % soit la différence entre les surfaces observées en 2020 (71 Mm²) et les surfaces en 2020 estimées par le SRCAE (69 Mm²). En 2050, chaque branche du secteur tertiaire garde la même portion de m² par rapport au total du secteur que la valeur de l'année de base.

Le besoin thermique par m² du parc existant est issu du ratio entre la consommation de chauffage et les surfaces observées pour l'année de base, cette valeur est constante pendant toute la période. La consommation de chauffage par m² neufs est de 35 kWh/m²/an (NégaWatt, 2014). En outre, 85 % des surfaces en 2050 sont déjà construites en 2017, les surfaces à construire sont donc la différence entre les surfaces projetées et celles existantes. La rénovation thermique des bâtiments tertiaires est soumise à des hypothèses spécifiques posées dans chacun des scénarios à analyser.

- La consommation des autres services énergétiques (ECS, cuisson, éclairage, climatisation, et autres usages électriques) à l'horizon 2050 est indexée à la croissance des surfaces tertiaires (environ 0,33 % par an).

PJ	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Autres usages électriques	13.26	13.35	13.49	13.64	13.79	13.94	14.09	14.24
Autres usages énergétiques	15.19	15.29	15.45	15.62	15.79	15.96	16.13	16.31
Chauffage	18.37	18.35	18.32	18.29	18.26	18.24	18.22	18.20
Climatisation	25.97	26.14	26.42	26.71	27.00	27.29	27.59	27.89
Cuisson	6.28	6.32	6.39	6.46	6.53	6.60	6.67	6.74
ECS	9.10	9.16	9.26	9.36	9.46	9.56	9.67	9.77
Éclairage	1.59	1.60	1.61	1.63	1.65	1.67	1.68	1.70
Total général	89.75	90.20	90.95	91.70	92.48	93.26	94.05	94.86

Tableau 20 : Projection de la demande de service énergétiques à l'horizon 2050 pour le secteur tertiaire

Secteur du transport

Le transport de passagers et de marchandises suit l'évolutions de différents facteurs.

- **Véhicules particuliers, utilitaires et motos** : pour projeter ces demandes, nous prenons en compte la croissance moyenne des kilomètres parcourus pour chaque type de véhicule pendant les dix dernières années. Cette hypothèse permet de prendre en compte l'augmentation de la population et du besoin de mobilité.
- **Poids lourds** : comme détaillé précédemment, la consommation de ce secteur est principalement affectée par la performance économique de la France et de la région. La tendance des dix dernières années montre une augmentation de la consommation énergétique et des kilomètres parcourus pour les BDR et le VAR et une réduction dans le reste de départements. De la sorte, suivre les tendances ne permet pas de capter les initiatives régionales pour garder sa compétitivité et sa création de valeur. Les scénarios de consommation pour les poids lourds sont très contrastés, certains envisagent une demande à la hausse portée par une augmentation du PIB tandis que les autres envisagent une tendance à la baisse (Bigo, 2020).

Pour la région SUD PACA, la demande de ce secteur sera donc 30 % plus haute en 2050 par rapport à 2017 pour les départements dont la consommation (km parcourus et consommation énergétique) a augmenté entre 2007 et 2017, et de 20 % pour les autres. Pour comparaison, le (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2020b) établit dans la SNBC l'hypothèse de limiter la consommation des poids lourds en 2050 de 40 % par rapport à 2015 pour le

scénario de référence, car ce secteur a montré une hausse en moyenne de 1,6 % depuis 2013 et de 2,2 % en 2018 (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2019b).

- **Bus** : les données fournies par AtmoSud pour la consommation des poids lourds, en termes de consommations énergétiques et de kilomètres parcourus, intègrent la consommation des bus. Il est ainsi indiqué que la consommation des bus correspond à 12 % de la consommation des poids lourds, c'est-à-dire que pour projeter la consommation des bus, nous ne pouvons pas prendre en compte les tendances des poids lourds car elles ne permettent pas de visualiser un comportement réaliste du secteur. Donc, pour tracer la trajectoire de ce secteur, la consommation des bus est indexée à la croissance de la population : pour augmenter la part modale des transports collectifs dans le transport de voyageurs, il faudra mettre en place des politiques spécifiques intégrées dans le cadre des hypothèses spécifiques dans chacun des scénarios analysés dans notre modèle.
- **Aviation, navigation, transport ferroviaire et trains de villes** : les consommations de ce secteur suivent la croissance moyenne d'énergie pendant les dix dernières années. Pour les trains de villes, cette augmentation représente les nouveaux projets qui sont en cours de développement sur le territoire, notamment dans la zone d'Aix-Marseille et de Nice.

La consommation du secteur du transport est visible à continuation :

		2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Transport de personnes (Million passagers / km)	Véhicules particulier	50 103	51 579	54 149	56 863	59 732	62 764	65 969	69 358
	Bus	4 551	4 589	4 647	4 703	4 758	4 807	4 848	4 883
Transport de marchandises (Mt / km)	Poids lourds	36 463	36 463	36 463	36 463	36 463	36 463	36 463	36 463
	Véhicules utilitaires	6 927	7 225	7 670	8 151	8 669	9 229	9 832	10 484
Transport de personnes par km	Motos	824	845	857	870	883	896	910	925
Consommations (PJ)	Tramways	157	161	168	174	181	189	196	204
	Traffic ferroviaire	2	2	2	2	2	2	2	2
	Navigation	7	7	8	8	8	9	9	9

Tableau 21 : Projection de la consommation du secteur du transport à l'horizon 2050

Secteur industriel et agriculture

- **Industrie** : la compétitivité de l'industrie régionale est préservée pendant toute la période, conservant un niveau de production similaire à celui de l'année de base. Cela suit une méthodologie similaire à celle développée dans la SNBC (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2020b). Nous retenons donc une croissance de 0,5 % par an pour la production industrielle.
- **Agriculture** : nous suivons ici les tendances montrées pendant les dix dernières années.

D'autres hypothèses sont prises dans le cadre d'une analyse de sensibilité avec une demande à la hausse et une à la baisse.

4.2.3. Modélisation de l'offre

4.2.3.1. Prix des énergies

La région peut soutirer de l'électricité provenant du réseau français, c'est-à-dire que dans le modèle la production de la région est en compétition avec l'électricité provenant d'autres régions françaises. Le coût d'utilisation de cette ressource suit le prix de l'électricité en France en 2017 issu de (Commissariat Général au développement Durable, 2018a). Donc, le coût de l'électricité provenant du réseau électrique français utilisé en 2017 pour le modèle est de 26.9 €/GJ (97 €/MWh), résultant de la moyenne entre le prix d'électricité (HTT²⁹) du secteur résidentiel de 106 €/MWh et le prix (HTT) de l'électricité pour le secteur industriel de 88 €/MWh. Ainsi, cette valeur de 26.9 €/GJ représente le coût associé au soutirage de l'électricité du réseau électrique français que chaque zone de la région devra payer pour chaque GJ d'énergie qu'elle va utiliser. Pour 2020, nous utilisons le prix de 2019 (Commissariat Général au développement Durable, 2020b). Ce coût restera constant jusqu'à 2050 car il s'avère compliqué de déterminer l'évolution du système sans prendre en compte un de ses éléments. Le prix de l'électricité en France évoluera en fonction du mix de production de l'ensemble des régions françaises, il faudra donc analyser l'évolution de ce prix sans prendre en compte le système de production de la région SUD PACA.

Pour calculer le coût d'utilisation du gaz naturel provenant du réseau gazier, nous suivons une méthodologie similaire à celle utilisée dans le cas de l'électricité du réseau. Ainsi, le coût pour utiliser le gaz naturel provenant du réseau gazier français est de 13.06 €/GJ (41 €/MWh), résultant de la moyenne entre le prix du gaz payé par le secteur résidentiel (HTT³⁰) de 52.58 €/MWh et le prix payé par les entreprises de 29.42 €/MWh. Ces prix sont issus de (Commissariat Général au développement Durable, 2018b). Pour 2020, nous prenons également les prix de 2019 (Commissariat Général au développement Durable, 2020a). L'évolution à l'horizon 2050 est quant à elle indexée sur les prévisions portées par la Commission européenne (European Commission, 2016).

Le prix des produits pétroliers (essence, gazole, fioul lourd, fioul domestique, gaz du pétrole liquéfié) en 2017 et 2020 suit également les données du (Commissariat Général au développement Durable, 2020a) et l'évolution à l'horizon 2050 est indexée sur la variation du prix du pétrole brut. Le coût du biofuel pour l'année de base est de 21.24 €/GJ (IFPEN, 2019) et son évolution à 2050 est aussi indexée sur l'évolution du prix du pétrole brut. Un résumé des coûts des énergies est donné dans le Tableau 22.

²⁹ Hors toutes taxes. Le prix de l'électricité pour le secteur résidentiel est constitué à 55 % par le coût de fourniture, 35 % pour le coût d'utiliser le réseau de distribution électrique et 10 % pour utiliser le réseau de transport d'électricité.

³⁰ Pour les ménages le prix du gaz HTT est composé à 23 % du coût du réseau de distribution, 7 % pour le réseau de transport et 41 % constitue le coût de la fourniture. Pour les entreprises, le prix est composé à 11 % par le coût de distribution, 7 % le coût du réseau de distribution et 66 % le coût de la fourniture.

€/GJ	2017	2020	2030	2050	Source
Pétrole brut	8.23	10.64	19.35	22.37	(Commissariat Général au développement Durable, 2020a)
Essence	14.62	18.90	34.34	39.70	
Diesel	12.54	16.21	29.46	34.05	
GPL	20.83	26.93	48.94	56.57	
LFO	12.32	15.92	28.94	33.45	
HFO	8.49	10.97	19.94	23.06	
Bio fuel	21.24	27.47	49.92	57.71	(IFPEN, 2019)
Gaz naturel	9.50	13.06	16.11	18.65	(Commissariat Général au développement Durable, 2020a) / (European Commission, 2016)
Électricité du réseau français	31.8	29	29	29	(Commissariat Général au développement Durable, 2018a)
Biogaz du réseau français	22	20	16.67	16.67	(Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2019b)

Tableau 22 : Le coût des énergies

4.2.3.2. Production d'électricité et de réseaux chaleur

Électricité

La production d'électricité est calibrée en utilisant les données de production d'AtmoSud et les détails de capacités installées du (ODRÉ, 2017) qui listent chacune des unités de production raccordées au réseau électrique français par commune, avec leur date de mise en fonctionnement, la tension de raccordement et le type d'énergie consommée ainsi que la puissance maximale. Un résumé du parc de production est détaillé à continuation :

Filière	Capacité Installée (GW)		Production (PJ)
	CHP	ELC	ELC
Bois	-	0.18	1.41
Charbon	-	0.58	1.00
Déchets	0.02	0.08	1.38
Gaz naturel	0.35	2.02	32.27
Hydraulique	-	3.21	28.70
Produits pétroliers	0.18	0.12	0.40
Solaire toiture	-	0.15	0.71
Biogaz	0.00	0.03	0.85
Solaire sol	-	0.97	4.62
Eolien	-	0.05	0.38
Total	0.54	7.38	71.72

Tableau 23 : Puissance et production de centrales électriques pour l'année de base

Les nouvelles technologies, ainsi que les caractéristiques technico-économiques associées, sont issues du modèle TIMES-France du CMA, un résumé de ces technologies est proposé dans l'Annexe 3. Une représentation schématique du système de production d'électricité pour le cas du solaire est détaillée dans la Figure 22. Ainsi, chaque zone déclinée dans le modèle a la possibilité d'envoyer librement une partie de l'électricité qui a été produite sur son territoire vers les autres zones, et à l'inverse, chaque zone peut consommer de l'électricité d'autres zones lorsque cela est plus rentable que de produire

dans son territoire. Ce transfert s'effectue dans notre modèle à travers la zone « PACA », qui représente le réseau électrique français. De plus, seule la zone « PACA » peut soutirer de l'électricité du reste du pays lorsque la production locale est insuffisante pour couvrir les besoins locaux ou lorsque cette électricité du réseau est moins coûteuse que la production locale.

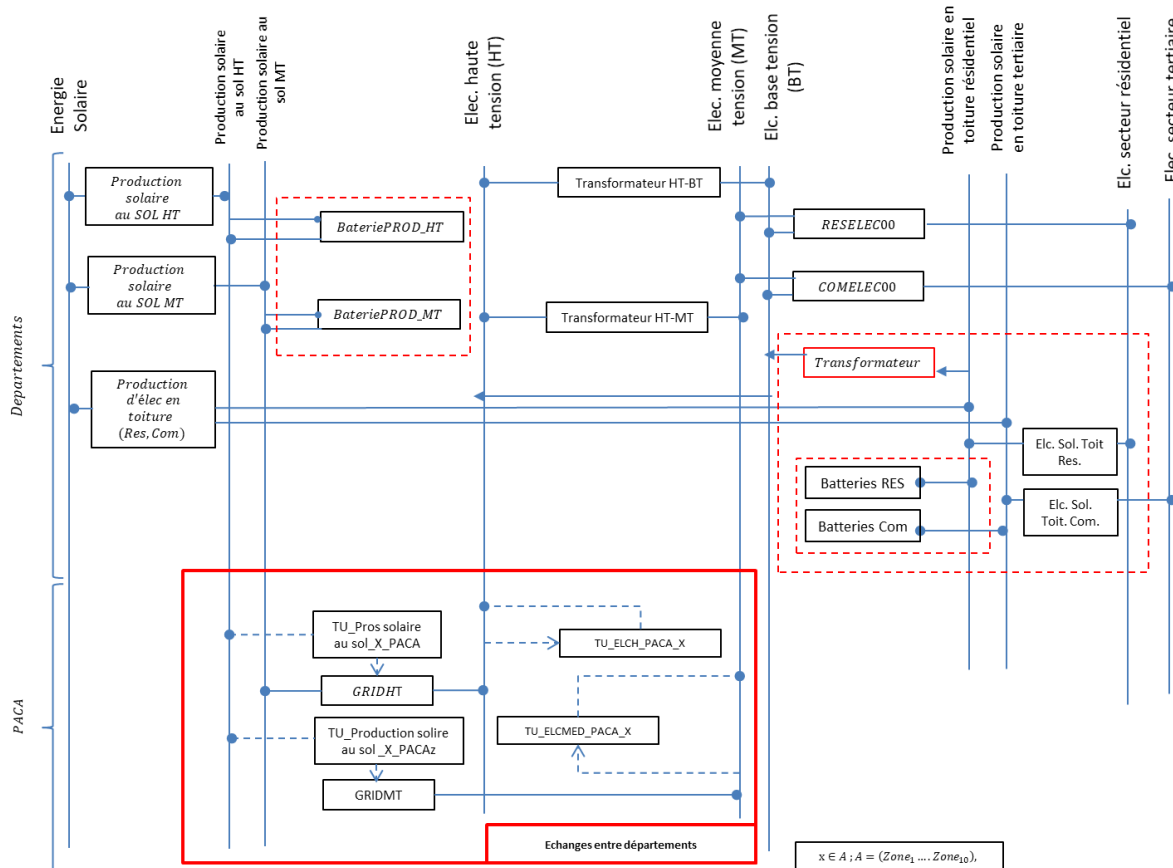


Figure 22 : RES de la production électrique solaire dans le modèle TIMES SUD PACA

En outre, nous distinguons la production solaire au sol et celle en toiture. L'électricité produite par le solaire au sol peut être stockée dans des batteries et être ultérieurement injectable dans le réseau électrique pendant des périodes à faible irradiation solaire. L'électricité provenant des technologies solaires en toiture peut quant à elle emprunter trois chemins. En premier lieu, elle peut être directement consommée par le secteur de l'habitat (résidentiel et tertiaire), en deuxième lieu, elle peut aussi être stockée dans des batteries et enfin, elle est injectable dans le réseau électrique pour être consommée par les autres secteurs. Les coûts associés aux batteries sont détaillés à continuation :

Type de batterie	Coûts d'investissements			Life
	2017	2030	2050	
Batterie - Lead-Acid	176		135	8
Batterie - Li-ion	660	224	216	10
Batterie - NaNiCl ZEBRA	157		68	10

Tableau 24 : Caractéristiques techniques et économiques de batteries

Une autre option de stockage d'électricité disponible dans le modèle TIMES SUD PACA consiste en la réutilisation des batteries provenant des véhicules électriques en fin de vie et permettant ainsi de donner une seconde vie à celles-ci. Ces batteries sont de type « Lithium-ion », avec une nouvelle durée

de vie de 6 ans mais présentent cependant une capacité de stockage diminuée de 25 % par rapport à une nouvelle batterie. Le prix retenu est de 84.89 €/MWh (Martinez-Laserna et al., 2018). Ces batteries sont disponibles en fonction de la sortie des véhicules électriques du marché.

La disponibilité des batteries à réutiliser n'est pas directement intégrée de façon endogène dans le modèle, c'est-à-dire que les véhicules électriques ne produisent pas de batteries dans le modèle. Leur disponibilité résulte plutôt d'hypothèses établies par le modélisateur.

Une autre option de stockage disponible correspond aux STEPS (stations de transfert d'énergie par pompage) qui consiste à conserver l'énergie sous forme cinétique par le pompage d'eau à partir d'un réservoir situé à un niveau inférieur pour le transporter vers un réservoir situé à un niveau supérieur. Cette eau permet alors de produire de l'électricité grâce à des turbines hydrauliques en cas de besoin. Les données techniques et économiques de cette option de stockage sont issues de l'étude (ORECA, 2017).

Zone	Commune	Puissance (MW)	Coût d'investissement (k€)	Facteur de disponibilité	Source
AM2	Belvédère	11	8400	7%	(ORECA, 2017)
AHP	Demandolx	28	14000	24%	
HA	Eygliers	1.6	5400	7%	
HA	Briançon	1.8	7500	7%	
VAR1	Tanneron	21	10000	24%	
AM1	Tende	15	6600	24%	
AM2	Vésubie	9	5000	7%	

Tableau 25 : Potentiels de STEP en région SUD PACA

Chaleur

L'énergie thermique livrée à travers les réseaux de chaleur existants dans la région a été calibrée en utilisant un annuaire des réseaux de chaleur et de froid (Via Sèva, 2017) que nous avons combiné aux production et consommation des réseaux de chaleur issues d'AtmoSud. Un résumé de l'énergie livrée à travers ces réseaux est donné dans le Tableau 26. Cette chaleur couvre environ 2 % de la consommation de chauffage du secteur de l'habitat.

Zone	Type de production	Energie consommé	Production (PJ)
AHP	Chaufferies	Charbon/Bois	0.0196238
AM1	Cogénération	Déchets Mun/Gaz	0.10989492
	Chaufferies	Bois	0.24125268
AM2	Chaufferies	Bois	0.00137
BDR1	Cogénération	Gaz/Fioul	0.87362426
BDR2	Cogénération	Gas	0.00028927
HA	Cogénération	Biogaz	0.0124646
	Chaufferies	Bois	0.00953049
VAR1	Cogénération	Déchets Mun/Gaz	0.13042725
VAR2	Network	Déchets Mun	0.00191426
VAUC	Cogénération	Gas/Biogaz	0.10399842

Tableau 26 : Production livrée par les réseaux de chaleur dans la région PACA

La production livrée par les différentes centrales est transportée à travers les réseaux de chaleur existants dans la région PACA. Cette énergie est ensuite récupérée par des échangeurs dans les bâtiments et utilisée par les technologies de demande finale.

L'investissement nécessaire pour développer de nouveaux réseaux de chaleur est de 39.18 €/GJ (141 €/MWh) et les coûts fixes sont de 16.94 €/GJ pour les zones urbaines et de 16.11 €/GJ pour les zones rurales (ADEME et al., 2019). Pour de nouveaux échangeurs, l'investissement est de 211 €/GW pour les bâtiments résidentiels et de 70 €/GW pour des bâtiments du secteur tertiaire (Millot, 2020). Ces nouveaux réseaux peuvent acheminer la chaleur produite par des centrales de cogénération ou utiliser la chaleur fatale issue de procédés industriels.

4.2.3.3. Production de gaz

Une représentation schématique de la production de biogaz, du biométhane, et d'hydrogène est donnée dans la Figure 23.

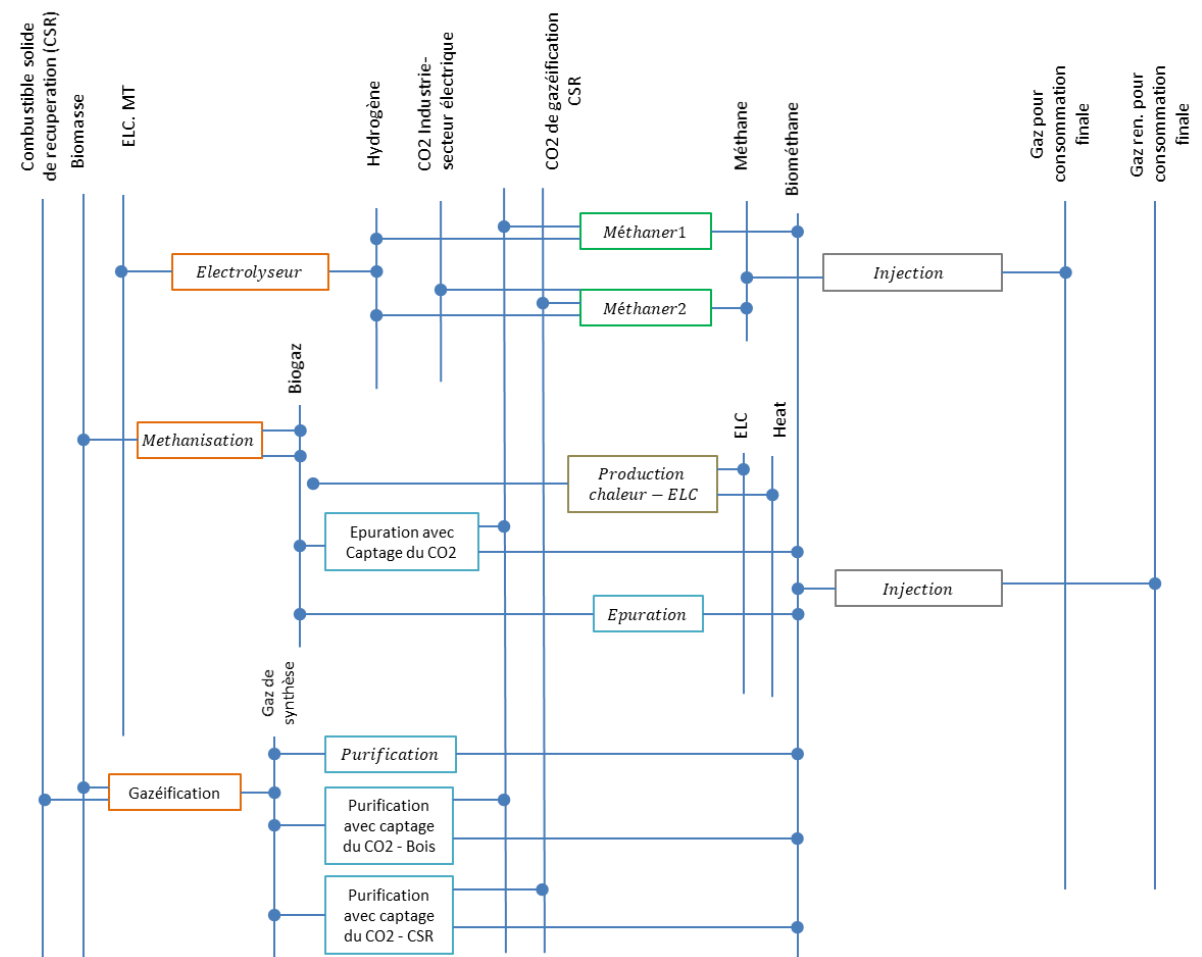


Figure 23 : SER de la production de biométhane et méthane de synthèse

La production de biogaz dans le modèle TIMES SUD PACA est issue d'un procédé de méthanisation, qui consiste en la digestion anaérobie de la matière biodégradable dans un digesteur par des micro-organismes en absence d'oxygène. Il en résulte du biogaz (constitué à 50 – 70 % de méthane et de CO₂)

et du digestat³¹. Les intrants possibles dans ce processus de méthanisation sont les déchets agricoles, les déchets verts et les boues de station d'épuration urbain (STEP). Le biogaz obtenu par ce processus est modélisé selon un coût variable de 60 €/MWh (ENEA Consulting, 2017).

Le biogaz produit peut être valorisé directement pour la production d'électricité et de chaleur à travers des cogénérateurs. En outre, il est possible de le valoriser par la production de biométhane qui sera ensuite injecté dans le réseau gazier. Pour cela, il faut épurer le biogaz, c'est-à-dire enlever le CO₂, pour avoir une concentration plus pure de CH₄. Le coût d'épuration est de 500 €/kWh. Ce CO₂ peut aussi être capturé et réutilisé dans un processus de méthanation (4.2.3.4). Dans ce cas, le coût de capture est de 9 € par tonne de CO₂ (Doudard, 2019). Un autre moyen de production de biométhane détaillé dans le modèle réside dans la gazéification qui consiste à chauffer de la biomasse lignocellulosique (bois et produits associés) ou des déchets (CSR) pour produire un gaz de synthèse (*syngaz*) dans des conditions de haute température et en présence d'une faible quantité d'oxygène. Cette pyrolyse des intrants libère les composés volatils et permet d'obtenir une particule de coke qui réagit avec l'agent de gazéification pour donner comme résultat un gaz composé en moyenne de monoxyde de carbone (20-30 %), d'hydrogène (30-45 %), de dioxyde de carbone (15-25 %), d'azote (3-5 %) et de méthane (8-12 %) (Sia Partners & France Biométhane, 2017). Le coût d'une unité de gazéification de biomasse est de 3 000 €/kW et pour la gazéification de CSR le coût est de 40 €/MWh (ADEME, 2018). Les rendements considérés pour ces technologies sont de 0,63 %. Le gaz de synthèse obtenu peut servir à plusieurs usages : dans un premier temps, il peut être utilisé pour produire directement de l'électricité et de la chaleur ; ensuite, on peut le purifier pour produire du biométhane qui sera injecté au réseau gazier. Le CO₂ capté est également utilisable dans l'étape de méthanation.

La gazéification peut aussi servir à produire directement de l'hydrogène, il n'y a donc pas postérieurement d'étape de méthanation (Sgobbi et al., 2016). Une autre option de production d'hydrogène détaillée dans le modèle est le reformage de la biomasse qui consiste d'abord en une étape de thermolyse des matières premières en l'absence d'oxygène avec une température entre 300 et 600°C, suivie par une étape de thermolyse en présence de vapeur d'eau et d'oxygène qui produit de l'hydrogène. Un résumé des caractéristiques technico-économiques de ces filières est détaillé dans le Tableau 27.

L'hydrogène fatal³² ne correspond pas à une source renouvelable car sa production est basée sur l'utilisation d'énergies fossiles. La valorisation de cet hydrogène fait partie des problématiques d'efficacité énergétique, par exemple à travers le processus de méthanation (ADEME, 2018). Le CO₂ à utiliser sera issu soit des procédés de gazéification ou de méthanisation, soit des activités industrielles. Selon (ADEME, 2018), le prix de l'approvisionnement en CO₂ industriel peut varier entre 5 et 20 €/MWh, la borne supérieure correspondant à une source de CO₂ renouvelable. Pour le modèle TIMES SUD PACA, nous avons retenu un prix moyen de 12.5 €/kWh.

³¹ Le digestat est le résidu matériel du procès de méthanisation, correspondant entre 70% à 90 % de la masse introduit dans le digesteur et peut être utilisé comme fertilisant pour les cultures.

³² L'hydrogène fatal, aussi appelle hydrogène coproduit, est issue de procédés industriels non destinées à sa production. Généralement il n'as pas une utilisation directe donc il est brulé ou rejeté à l'air libre.

Données technologies		Coûts d'investissements			Coût variable €/GJ	Coût fixe	Source
		2017	2030	2050	2025	2025	
Electrolyseurs (€/kW)	Proton Exchange membrane	1500	950	750		45 (M€/GW)	(Sgobbi et al., 2016)
	Alcaline large	625	377	377	0.06	41.5 (M€/GW)	
	Alcaline Moyen	1779	444		0.06	89.9 (M€/GW)	
	Alcaline petit	1940	512		0.9	136.7 (M€/GW)	
	Injection hydrogène	963	933	467			(Doudard, 2019)
Gazéification – Prod. H2 (€/kW)	Centralisée - bois/CSR	2453			0.86	122.5182	(Sgobbi et al., 2016)
	Decentralisée - bois/CSR	3814			1.7	76.2042	
Reformage (€/kW)	Réformage de la biomasse	519	519		0.18	20.77 (M€/GW)	
Biogaz (€/kW)	Méthanisation €/MWh				60		(Doudard, 2019)
	Purification	500	450	405			
	Epuration biogaz (€/t)				9		
	Pyrogazéification - Bois	3000		2500			
	Pyrogazéification - CSR (€/MWh)				40		
	Méthaneur	3267	447	263			
	Injection biométhane	354	267	193			
Stockage d'énergie (€/kWh)	H2 - Souterrain centralisé	2.7				0.3 (€/kWh)	(Sgobbi et al., 2016)
	H2 - Tank centralisé	13				0.8 (€/kWh)	
	H2 - Tank décentralisé	7.5				0.4 (€/kWh)	

Tableau 27 : Caractéristiques technico-économiques de technologies de production et stockage d'hydrogène

4.2.3.4. Le Power-to-Gas (P2G)

L'augmentation de la part de technologies renouvelables dépendantes de la météo dans le mix électrique pose divers défis, dont celui de prévoir sa production, de capter la production électrique excédentaire pendant de faibles périodes de consommation électrique et de couvrir le manque de production dans des périodes d'absence de soleil ou de vent. Par conséquent, le power-to-gas (P2G) émerge comme une solution pour pallier cette variabilité et donner plus de flexibilité au réseau électrique en transformant l'électricité en un autre vecteur énergétique de forme gazeuse, notamment comme l'hydrogène ou le méthane. Ceux-ci peuvent ainsi être stockés et consommés ultérieurement. Le P2G est également une option permettant l'introduction d'énergies décarbonées dans des secteurs où l'électricité a de fortes difficultés à trouver une place, comme c'est le cas dans le secteur du transport, et plus spécifiquement pour les poids lourds.

Dans le modèle TIMES SUD PACA, deux solutions de P2G sont représentées : l'électrolyse de l'eau et la méthanation.

Tout d'abord, l'électrolyse de l'eau consiste en la décomposition de l'eau (H₂O) en gaz oxygène (O₂) et gaz hydrogène (H₂) à travers un courant électrique continu. Deux types d'électrolyseurs sont représentés dans le modèle TIMES SUD PACA :

- Électrolyseurs Alcalins, qui reposent sur l'immersion des deux électrodes dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium. Les électrodes sont séparées par un diaphragme afin de séparer les molécules d'hydrogène et oxygène.
- Électrolyseurs PEM (*Proton Exchange Membrane*), où le procédé d'électrolyse passe dans une cellule équipée d'un électrolyte polymère solide (qui remplace la solution aqueuse utilisée dans les électrolyseurs alcalins) responsable de la conduction des protons, de la séparation des gaz produits et de l'isolation électrique des électrodes.

L'implémentation dans le modèle TIMES SUD PACA de la chaîne de production, de transport et de distribution d'hydrogène est basée sur le modèle développé par le JRC 2016 (Bolat & Thiel, 2014a, 2014b; Sgobbi et al., 2016) et sur les travaux de (Doudard, 2019). Une représentation schématique de la chaîne de production d'hydrogène est donnée dans la Figure 24.

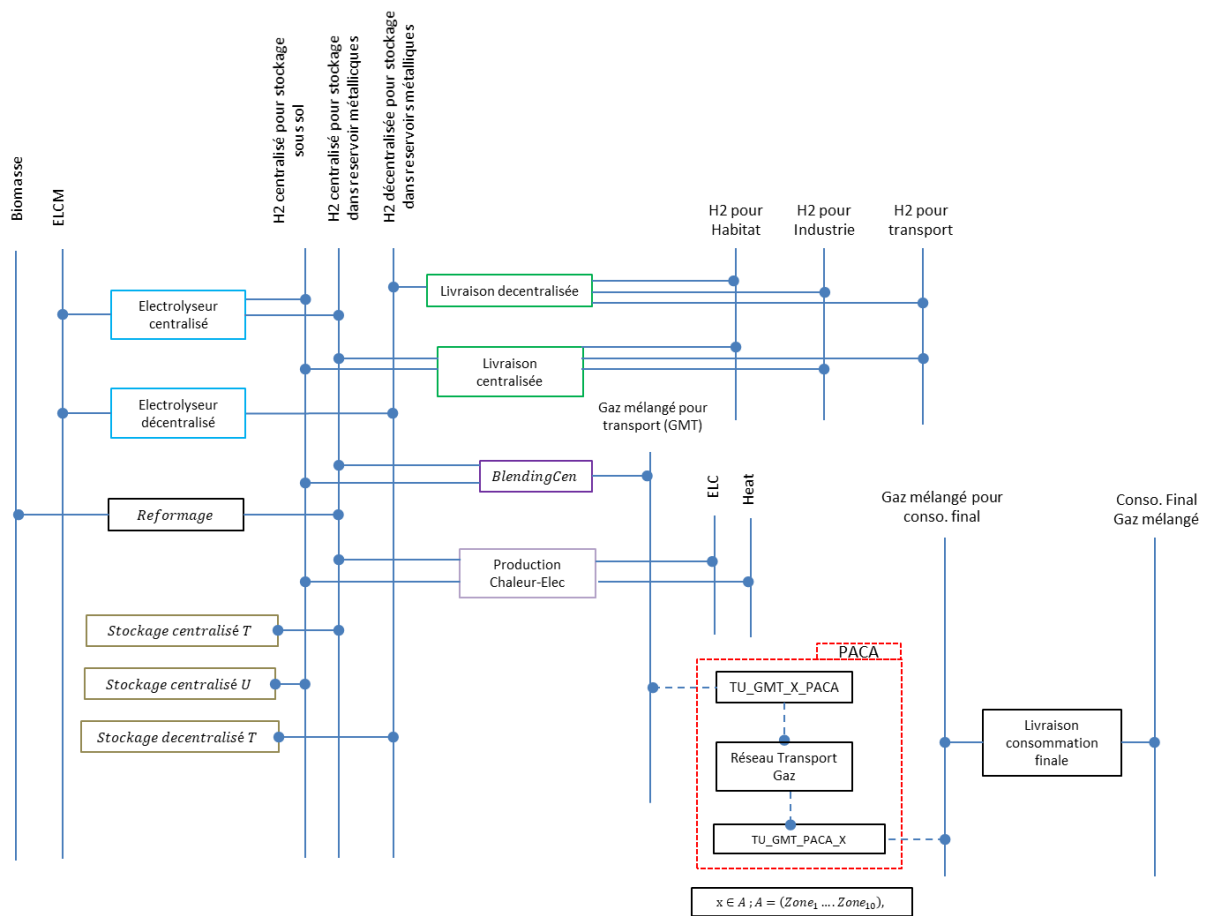


Figure 24 : SER de la production d'hydrogène dans le modèle TIMES SUD PACA

Ainsi, la production d'hydrogène par les électrolyseurs est modélisée en détail. La production est distinguée entre production centralisée et décentralisée avec des voies de distribution associées. Dans le premier cas, la production d'une zone peut être transportée et utilisée dans une autre zone à travers différentes chaînes d'approvisionnement détaillées dans le Tableau 28. L'hydrogène peut s'utiliser directement pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que pour couvrir les besoins énergétiques du secteur de transport et de l'industrie. L'hydrogène issu d'une production centralisée peut être injecté dans le réseau gazier à hauteur maximale de 6 % en volume (2 % en énergie). Ce pourcentage pourra évoluer jusqu'à 20 % en volume (6 % en énergie) en 2050 (GRTgaz, 2019). La

production centralisée a la possibilité d'être stockée dans une cavité saline d'une capacité de 250 000 m³, située dans la zone AHP (donc disponible seulement dans ce département) (LE HEN, 2019). Pour les autres zones, l'hydrogène produit peut être stocké dans des réservoirs métalliques. Dans le deuxième cas, la production d'hydrogène décentralisée représente une production sur site et permet de représenter des projets locaux comme le projet *HynoVAR* qui envisage la production d'hydrogène pour alimenter 7 bus à hydrogène.

Paramètres technico-économique des technologies de livraison d'hydrogène pour les années 2017 et 2030									
Secteur	Description de la technologie	Facteur de disponibilité	Coût d'investissement [€/GJ/a]		FOM [€/GJ/a]		VOM [€/GJ]		Durée de vie
			%	2017	2030	2017	2030	2017	
De la production centralisée									
TRA	COMP + TR + LIQ + LSTORB + RTS + REFL (grand, avec ou sans stockage souterrain)	75%	38,71	27,3	2,02	1,43	0,95	0,65	20
TRA	COMP + TR + LIQ + LSTORB + RTS + REFLG (grand, avec ou sans stockage souterrain)	75%	65,69	45,79	2,72	1,90	0,34	0,24	20
RSD et IND	COMP + TR + DP (avec ou sans stockage souterrain)	70%	34,04	30,29	1,78	1,57	0,36	0,32	20
TRA	COMP + TR + DP + REFGG (grand, avec ou sans stockage souterrain)	70%	80,55	62,02	5,78	4,30	0,55	0,44	20
TRA	COMP + USTOR + TR + GSTORB + RTS + REFGG (petite)	80%	66,00	47,16	5,02	3,53	0,27	0,19	20
De la production centralisée pour le mélange d'hydrogène avec du gaz									
Tous les secteurs	COMP + USTOR + TR + INJ	70%	5,87	4,92	0,37	0,30	0,08	0,06	20
De la production décentralisée									
RSD	LOGGSTORB + DP - résidentiel	70%	51,84	43,58	2,5	2,11	0,28	0,25	20
TRA	LOGGSTORB + ONSITELIQ + REFL (grand)	70%	144,84	98,93	8,99	6,09	1,78	1,20	20
TRA	LOGGSTORB + REFGG (petite)	70%	70,18	49,93	5,09	3,57	0,19	0,13	20

Abréviations: RSD, résidentiel; COM, commercial; TRA, transport; IND, industrie; SUP, approvisionnement; ELC, électricité; AGR, agriculture; COMP, compression; TR, pipeline de transport; LIQ, liquéfaction; ONSITELIQ, liquéfaction sur site; LSTORB, stockage liquide en vrac; LSTORS, stockage de liquides petit; GSTORB, stockage de gaz en vrac; LOGGSTORB, stockage local de gaz en vrac; GSTORS, petit stockage de gaz (comprimé); USTOR, stockage souterrain; RTS, transport routier court; RTL, long transport routier; DP, pipeline de distribution; REFL (taille), ravitaillement en liquide en liquide (taille); REFLG (taille), ravitaillement en gaz liquide (taille); REFGG (taille), ravitaillement en gaz (taille).

Tableau 28 : Paramètres technico-économiques des technologies de livraison d'hydrogène (extrait de (Sgobbi et al., 2016))

La production d'hydrogène peut être également valorisée à travers la méthanation. Il s'agit d'un procédé de synthèse du méthane à partir du mélange de dioxyde de carbone et d'hydrogène. Le CO₂ capté du processus de gazéification et d'épuration du biogaz est utilisé pour être mélangé avec l'hydrogène et produire du biométhane pour injection dans le réseau gazier. Il est aussi possible de récupérer du CO₂ à partir des activités industrielles et les utiliser dans ce procédé. Le captage de CO₂ peut s'effectuer dans des centrales électriques à gaz suivant les caractéristiques technico-économiques considérées dans le modèle TIMES-France du CMA. Le CO₂ peut être aussi capté dans des usines de production de ciment et de l'acier suivant (Griffin et al., 2013). Ces deux procédés de captage peuvent se développer dans la zone BDR1, tandis que le captage dans des usines de ciment peut aussi se développer dans la zone AM1.

Dans le cas où le CO₂ a une source biogénique (méthanisation ou gazéification de la biomasse), le niveau d'émissions produites pendant la consommation finale du biométhane est nul dans TIMES SUD PACA. Dans le cas où le CO₂ provient de sources non renouvelables (industrie ou gazéification de CSR), le niveau d'émissions utilisé est de 48 gCO₂/MJ (Meylan et al., 2017) contre 56 gCO₂/MJ pour la consommation du gaz naturel. Correctement identifier l'origine du CO₂ permet donc de mieux éclairer le potentiel de décarbonation des différentes technologies candidates.

Ainsi, les seules techniques de captage de CO₂ possibles dans le modèle correspondent aux sites de production de ciment (AM1 et BDR1) et d'acier (BDR1) et l'unique option d'utilisation du CO₂ (CUC)

réside dans la méthanation, les autres options de captage et de stockage de CO₂ (CSC) étant considérées comme indisponibles dans la région. En effet, les principaux sites qui pourront stocker géologiquement du CO₂ en France se trouvent à Dunkerque, Le Havre, et Lacq (ADEME, 2020).

4.2.3.5. Le réseau gazier

Le réseau gazier est représenté de manière très détaillée dans le modèle afin de pouvoir mieux identifier et suivre les émissions de gaz à effet de serre de chaque type de gaz consommé. Ce dernier point est particulièrement important car il est possible d'injecter différents types de gaz (du biogaz, du méthane de synthèse, d'hydrogène et du gaz naturel) dans le réseau gazier, donnant comme résultat un gaz mélangé. Appliquer un facteur d'émission à la consommation finale (comme pour les autres énergies) pour ce type de gaz mélangé n'aurait pas été pertinent car le modèle peut choisir librement le mix gazier à injecter dans le réseau, sauf pour l'hydrogène qui est limité à un niveau d'injection maximal de 6 % en énergie (20% en volume) en 2050. Ainsi, pour déterminer le niveau d'émission de chaque gaz, un facteur d'émission à l'entrée du réseau est appliqué pour chaque type de gaz. Différentes représentations du réseau gazier sont modélisées, pour donner la possibilité de consommer différents gaz. La représentation du réseau gazier est détaillée dans la Figure 25.

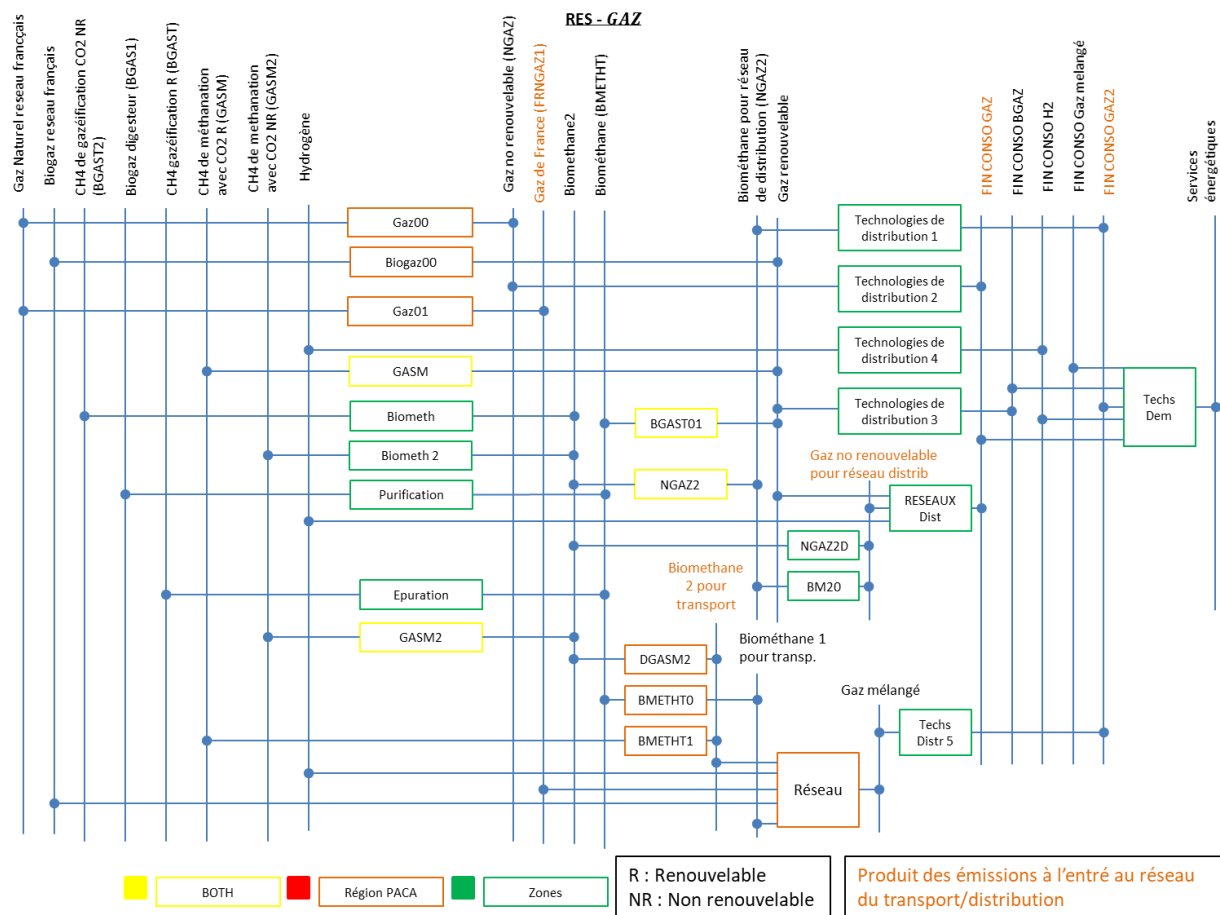


Figure 25 : Représentation du réseau gazier dans le modèle TIMES SUD PACA

4.2.4. Les potentiels des énergies renouvelables

Différentes études ont été réalisées pour identifier les potentiels d'énergies renouvelables de la région SUD PACA. Dans cette section, nous allons détailler ces études et celles retenues pour la présente analyse prospective.

4.2.4.1. Potentiels de récupération de chaleur

Potentiel de récupération de chaleur dans les eaux usées

En 2011, (Antea Group, 2011) a développé une étude pour déterminer l'énergie thermique récupérable d'eaux usées. Dans ce travail, diverses hypothèses ont été prises en compte pour le potentiel issu des stations d'épuration et des collecteurs d'assainissement, principalement les capacités de traitement et les débits des eaux usées dans différentes périodes de l'année. Ont également été pris en compte la distance entre les sources de chaleur et les potentiels consommateurs. Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 29. Pour le présent exercice de modélisation, ce potentiel peut être utilisé à travers des réseaux de chaleur qui vont acheminer la chaleur vers les bâtiments, où des échangeurs vont la distribuer pour la production d'ECS et/ou de chauffage.

PJ	Potentiel théorique de récupération de chaleur en sortie de stations d'épuration	Potentiel de récupération de chaleur dans les collecteurs d'assainissement	Potentiel de récupération de chaleur dans les sorties des bâtiments
AHP	0.03	-	0.02
HA	0.05	-	0.03
AM1	0.59	0.12	0.20
AM2	-	-	-
BDR1	0.97	0.20	0.12
BDR2	-	-	-
VAR1	0.41	0.05	0.07
VAR2	-	-	-
VAUC	0.29	0.05	0.07
Total	2.33	0.41	0.50

Tableau 29 : Potentiel de récupération de chaleur des eaux usées (Antea Group, 2011)

Potentiel de récupération de chaleur fatale

Les potentiels de récupération de chaleur fatale sont issus de (ADEME, 2017). Le potentiel pour la région SUD PACA atteint les 33 PJ (9190 GWh) soit 8 % du gisement français. La chimie représente 45 % de ce potentiel. Donc, pour déterminer le potentiel pour chacune des zones du modèle, nous avons utilisé une moyenne pondérée considérant 45 % pour l'industrie chimique et 55 % pour le reste de l'industrie. Selon l'étude nationale, 1,1 TWh du total du potentiel de chaleur fatale peut être utilisé pour la production d'électricité. Pour trouver la proportion de ce potentiel qui correspond à la région SUD PACA, un taux de 8 % a été appliqué (selon la partie de potentiel de la région), soit 0,33 PJ (92,3 GWh). Le potentiel par zone est présenté dans le Tableau 30.

PJ	Chaleur fatale pour la production d'électricité	Chaleur fatale pour les réseaux de chaleur
AHP	0.01	0.50
VAUC	0.01	1.29
AM1	0.01	0.93
AM2	0.00	0.09
BDR1	0.30	29.33
BDR2	0.00	0.24
VAR1	0.00	0.33
HA	0.00	0.04
VAR2	0.00	0.02
Total	0.33	32.75

Tableau 30 : Potentiels de récupération de chaleur fatale (ADEME, 2017)

Ce potentiel peut couvrir autour de 50 % de la consommation du chauffage que la région a montré en 2017.

Potentiel de récupération d'hydrogène fatal

L'estimation du potentiel d'hydrogène fatal est donné par (ADEME, 2018). Nous considérons que celui-ci se trouve dans les zones à forte consommation où se concentrent principalement les activités industrielles. Ce potentiel pourra être notamment utilisé pour la production de biométhane.

PJ	H ₂ Fatal
AHP	-
HA	-
AM1	0.32
BDR1	0.48
VAR1	0.32
VAUC	0.16
TOTAL PACA	1.27

Tableau 31 : Potentiel d'hydrogène fatal dans la région SUD PACA (ADEME, 2018)

4.2.4.2. Potentiel solaire

La région SUD PACA se caractérise par son climat plus tempéré, avec une moyenne de 2 703 heures d'ensoleillement par an contre 2 089 en moyenne dans le reste de la France en 2020 (Linternaute, 2020). Ce fort ensoleillement conduit à une attention marquée pour l'exploitation des ressources solaires, positionnant la région comme le troisième territoire français en termes de puissance photovoltaïque installée. À ce propos, différentes études ont été réalisées pour déterminer le potentiel de développement des technologies utilisant cette ressource ; celles-ci seront détaillées par la suite.

(AXENNE, 2009) détermine un potentiel de 12 PJ pour la production solaire en toiture à l'horizon 2030 et de 20 PJ pour le solaire photovoltaïque au sol. Ce potentiel correspond à près de 25 % de la consommation électrique de la région en 2017. L'étude prend en compte plusieurs contraintes telles que la protection de l'environnement et du patrimoine bâti, ainsi que de raccordement au réseau.

En 2016, une évaluation sur le potentiel macroscopique du photovoltaïque mobilisable au sol dans le sud de la France est développée par (Cerema Méditerranée, 2016). Cette étude est mise à jour en 2019

selon 97 nouveaux critères. Plus précisément, à chaque critère de sensibilité analysé est ajouté un niveau d'enjeu entre « réhibitoire³³ », « fort³⁴ » « modéré³⁵ », ou « non identifié³⁶ », qui exprime la possibilité d'implantation de panneaux photovoltaïques au sol (Cerema Méditerranée, 2019). Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 32.

PJ	Enjeu fort	Enjeu modéré	Enjeu non identifié
AHP	351.32	-	-
HA	65.33	-	-
AM1	11.12	0.18	0.23
AM2	100.07	0.28	0.03
BDR1	65.95	14.13	8.88
BDR2	153.88	1.57	0.47
VAR1	44.31	1.35	0.78
VAR2	103.39	7.63	4.42
VAUC	134.22	11.27	3.59
TOTAL	1,029.59	36.41	18.40

Tableau 32 : Gisement de production solaire photovoltaïque au sol

L'étude détaille les niveaux de potentiels au niveau des départements. Pour déterminer un potentiel pour les zones à forte et faible consommation de notre modèle, nous avons établi plusieurs hypothèses (Tableau 33) en fonction des cartes présentées dans l'étude développée par le Cerema.

	Enjeu fort	Enjeu modéré	Enjeu non identifié
AM1	10%	40%	90%
AM2	90%	60%	10%
BDR1	30%	90%	95%
BDR2	70%	10%	5%
VAR1	30%	15%	15%
VAR2	70%	85%	85%

Tableau 33 : Part du potentiels solaire photovoltaïque au sol par zone

³³ Enjeu « réhibitoire » : concerne les secteurs pour lesquels au moins un texte, une pratique locale ou une disposition technique, législative ou réglementaire empêche l'implantation d'équipement photovoltaïque au sol.

³⁴ Enjeu « fort » : concerne les secteurs d'intérêt remarquable ou qui n'ont pas vocation à accueillir un équipement photovoltaïque, même si aucune disposition législative ou réglementaire ne l'exclut catégoriquement et qu'une autorisation reste envisageable à travers une évaluation particulièrement approfondie des incidences. Le niveau d'enjeu identifié incite les services déconcentrés de l'État à considérer que ces secteurs ne peuvent contribuer au potentiel de production photovoltaïque du territoire sinon de façon exceptionnelle.

³⁵ Enjeu « modéré » : concerne les secteurs sans protection environnementale réglementaire particulière ou les secteurs qui n'ont pas été signalés au titre des deux niveaux de sensibilité précédents. Ils devront en revanche faire l'objet d'une analyse approfondie des incidences éventuelles. Le niveau d'enjeu identifié incite à considérer que ces secteurs peuvent contribuer au potentiel de production photovoltaïque du territoire mais ne constituent pas des zones d'implantations prioritaires.

³⁶ Enjeu « non identifié » : l'absence d'enjeu identifié incite les services déconcentrés de l'État à considérer que le potentiel exploitable doit également porter en priorité sur ces territoires, ce qui ne préjuge pas des enjeux éventuels qui pourront être mis en valeur localement. Les zones couvertes par cet enjeu peuvent donc être considérées, au regard des trois autres enjeux définis ci-dessus, comme étant des zones propices au développement des parcs photovoltaïques au sol.

Les potentiels totaux (sans prendre en compte les potentiels rédhibitoires) de production photovoltaïque au sol pourraient ainsi couvrir autour de 70 % de la consommation française électrique en 2017 (1 735 PJ).

Concernant le gisement de la filière photovoltaïque sur toiture dans la région PACA, le potentiel retenu par l'ADEME est de 22 GW (ADEME, 2015). Cela peut correspondre à une production de 112 PJ avec un facteur d'activité de 15 %. Selon la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) de la région, environ 20 % des bâtiments sont concernés par certaines contraintes, notamment patrimoniales, techniques et économiques, qui empêcheraient l'installation de panneaux photovoltaïques (DREAL PACA, 2020). Ainsi, suivant ces spécifications, le gisement pour chaque zone est détaillé dans le Tableau 34. Ce gisement ne prend toutefois en compte que les bâtiments existants. Enfin, pour la production provenant des centrales photovoltaïques sur des parkings, les données ont été extraites du cadastre énergétique de la région SUD PACA³⁷. Pour ces deux potentiels on considère qu'ils vont rester constants pendant la période car ils seront renouvelés par les nouveaux bâtiments. Ce cadastre montre « *ce qui peut être installé sur le territoire pour l'avenir* » (ORECA, 2019).

En PJ	Gisement de production photovoltaïque sur grandes toitures	Productible photovoltaïque sur parkings
AHP	4.41	0.33
HA	3.74	0.44
AM1	11.74	1.29
AM2	0.88	0.09
BDR1	27.39	4.01
BDR2	2.06	0.52
VAR1	18.79	0.94
VAR2	1.41	0.11
VAUC	13.58	1.07
Total	84.01	8.80

Tableau 34 : Potentiel de production électrique sur toiture et sur parking pour la région SUD PACA

4.2.4.3. Potentiel éolien

(Valorem-Conexia Energy, 2010) ont réalisé un calcul du potentiel de production d'électricité d'origine éolienne terrestre en région SUD PACA. Selon différents enjeux techniques, économiques, environnementaux et paysagers, ce potentiel en 2030 atteint 1 305 MW, ce qui représente une production de 10 PJ/an, soit environ 50 % de la production électrique de la région SUD PACA en 2017. Le potentiel par département est détaillé dans le Tableau 35.

³⁷ <https://www.siterre.fr/paca/#/carte>

En PJ	2020	2030	2050
AHP	0.98	2.38	5.75
HA	0.90	1.56	2.69
AM1	0.04	0.54	0.05
AM2	0.70	0.95	2.43
BDR1	0.76	1.89	2.30
BDR2	0.76	0.09	0.05
VAR1	0.55	0.47	3.38
VAR2	0.03	1.09	0.85
VAUC	1.23	2.21	3.98
Total	5.94	11.18	21.48

Tableau 35 : Potentiel de production électrique d'origine éolien

Pour estimer le potentiel en 2050, la tendance entre 2020 et 2030 est prolongée. Pour calculer les potentiels des zones littorales et des zones du nord de la région, plusieurs hypothèses (présentées dans le Tableau 36 ont été établies en fonction des cartes présentées dans l'étude du potentiel. Ces cartes sont présentées dans l'Annexe 2.

	Part du potentiel éolien en 2020	Part du potentiel éolien en 2030	Part du potentiel éolien en 2050
BDR1	50%	100%	98%
BDR2	50%	5%	2%
VAR1	95%	30%	80%
VAR2	5%	70%	20%
AM1	5%	40%	2%
AM2	95%	70%	98%

Tableau 36 : Part du potentiel éolien par zone de modélisation

Le gisement éolien en mer pour la région PACA est estimé entre 0.9 GW et 3.2 TWh/an pour les turbines non flottantes et entre 13.4 GW et 57.7 TWh/an pour les turbines éoliennes flottantes (ADEME & Armines PERSEE, 2015).

4.2.4.4. Potentiel géothermique

Le potentiel mobilisable de production énergétique issue de la géothermie est de 137 PJ (27 % de la consommation énergétique de la région en 2017) d'après (BRGM, 2013). Ce potentiel mobilisable prend uniquement en compte les mailles éligibles, c'est-à-dire classées favorables ou très favorables. Pour identifier le potentiel pour chaque zone du modèle, nous combinons une carte issue du cadastre énergétique régional montrant le détail des types de mailles géothermiques dans la région SUD PACA (Annexe 2) et le potentiel par département de l'étude. Ainsi le potentiel géothermique mobilisable est résumé dans le tableau suivant :

En PJ	Potentiel géothermique mobilisable
AHP	1.98
HA	2.03
AM1	28.82
AM2	3.20
BDR1	47.92
BDR2	20.54
VAR1	18.45
VAR2	2.05
VAUC	11.80
Total	136.80

Tableau 37 : Potentiel géothermique mobilisable

4.2.4.5. Potentiel hydraulique

Le potentiel hydraulique retenu pour notre modèle est issu de l'étude (CEREMA, 2015). Cette étude détaille le potentiel hydraulique résiduel susceptible d'être mobilisé sur les cours d'eau avec un débit d'eau supérieur à 50 l/s ce qui permet de tenir compte de la « petite hydroélectricité ». Ce potentiel est classé en 4 groupes selon leur niveau de faisabilité s'échelonnant de « non mobilisable » à « facilement mobilisable ». Les potentiels sont détaillés ci-dessous :

En MW	AHP	HA	AM1	AM2	BDR1	BDR2	VAR1	VAR2	VAUC	Total
Puissance non mobilisable	1.52	1.44	1.32	0.71	0.86	1.28	0.24	0.10	2.71	10.17
Puissance difficilement mobilisable	0.65	1.19	0.01	0.07	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	2.02
Puissance mobilisable sous conditions strictes	0.36	1.22	0.02	0.29	0.02	0.00	0.02	0.05	0.10	2.08
Puissance mobilisable sans conditions particulières	0.06	0.14	0.05	0.13	0.02	0.00	0.05	0.02	-	0.46
Total	2.59	3.99	1.39	1.19	0.90	1.29	0.33	0.18	2.86	14.73

Tableau 38 : Potentiel hydraulique résiduel dans les cours d'eau dans la région SUD PACA

Le potentiel hydraulique pourrait couvrir environ 11 % de la consommation électrique de la région, mais si seulement la puissance mobilisable sous conditions strictes et sans conditions particulières est prise en compte il pourra se couvrir que 2 % de la demande électrique.

4.2.4.6. Potentiel de biomasse

Différentes études présentant le potentiel de la production des matières valorisables pour la production de biogaz ont été développées pour la région SUD PACA. Tout d'abord, (Hélianthe, 2015) présente un calcul du potentiel de la biomasse pour la production de biogaz à travers la méthanisation, avec une estimation de 7 PJ. Les hypothèses prises en compte dans cette étude sont très conservatrices, quelques potentiels étant sous-estimés et devant être réévalués (Région SUD, 2017a). En outre, (S3D, 2018) présente les potentiels des matières récupérables pour la production de biogaz de deuxième génération, c'est-à-dire que le biogaz est purifié pour produire du biométhane puis injecté dans le réseau gazier (voir section 4.2.3.3). Ils estiment ainsi un gisement de la biomasse avant de déterminer le potentiel mobilisable à l'horizon 2030. Ils obtiennent qu'environ 26 % du gisement

peut être exploitable à l'horizon 2030 (26 PJ) pour la production du biogaz de deuxième génération. Les gisements sont détaillés dans le Tableau 39.

PJ	Déchets agricoles	Déchets verts	Bois énergie	Combustibles solides de récupération (CSR)	Pneus	Boues de STEPS	Déchets d'activités économiques (DAE)
AHP	1.08	0.01	0.10	0.00	-	0.08	0.16
HA	0.65	0.01	0.10	-	-	0.04	0.06
AM1	0.07	0.48	5.27	0.55	-	0.26	3.43
AM2	0.03	0.01	0.14	0.24	-	-	0.06
BDR1	1.33	0.51	5.62	0.86	1.03	0.61	4.42
BDR2	2.81	0.04	0.47	-	-	0.03	0.40
VAR1	0.42	0.23	2.53	0.78	-	0.38	1.09
VAR2	0.36	-	-	-	-	0.01	-
VAUC	2.96	0.07	0.82	-	-	0.11	0.44
Total	9.72	1.36	15.05	2.43	1.03	1.51	10.08

Tableau 39 : Potentiel des matières pour la production du biogaz de deuxième génération issu de (S3D, 2018)

Ce gisement peut couvrir presque 50 % de la consommation de gaz naturel de la région SUD PACA en 2017. Dans le modèle TIMES SUD PACA, les CSR, les pneus et les DAE sont regroupés dans un seul ensemble appelé « MUNWASTE ».

La disponibilité en bois énergie calculée par S3D est en cohérence avec les calculs du Schéma régional Biomasse qui estime que le bois énergie sera disponible à hauteur de 18 PJ à l'horizon 2030 (S3D, 2018). Pour déterminer le bois disponible en 2050, nous utilisons les estimations de l'ADEME de 28 PJ. Ce potentiel de bois est mis en concurrence avec les différents usages, notamment pour l'utilisation dans des chaufferies ou la production de biométhane. Le coût de mobilisation du bois, à savoir 23 €/MWh, suit la même source (ADEME, 2018)

Dans le Tableau 40, nous présentons un résumé des gisements des énergies renouvelables utilisés dans notre modèle TIMES SUD PACA.

	Récupération de chaleur sur les eaux usées	Chaleur fatale	H ₂ Fatal	Photovoltaïque au sol	Photovoltaïque sur toiture	Eolien	Géothermie	Hydraulique	Déchets agricoles	Déchets verts	Combustibles solides de récupération	Pneus	Boues de STEP	Déchets d'activités économiques	Bois énergie
AHP	0.05	0.51	-	351.32	4.74	5.75	1.98	2.59	1.08	0.01	-	-	0.08	0.16	3.62
HA	0.05	1.30	-	65.33	4.18	2.69	2.03	3.99	0.65	0.01	-	-	0.04	0.06	2.98
AM1	0.59	0.94	0.32	11.53	13.03	0.05	28.82	1.39	0.07	0.48	0.55	-	0.26	3.43	2.48
AM2	-	0.09		100.38	0.97	2.43	3.20	1.19	0.03	0.01	0.24	-	-	0.06	4.99
BDR1	0.97	29.63	0.48	88.96	31.40	2.30	47.92	0.90	1.33	0.51	0.86	1.03	0.61	4.42	2.16
BDR2	-	0.24		155.92	2.58	0.05	20.54	1.29	2.81	0.04	-	-	0.03	0.40	2.34
VAR1	0.41	0.33	0.32	46.44	19.73	3.38	18.45	0.33	0.42	0.23	0.78	-	0.38	1.09	4.65
VAR2	-	0.04		115.44	1.52	0.85	2.05	0.18	0.36	-	-	-	0.01	-	1.60
VAUC	0.29	0.02	0.16	149.08	14.65	3.98	11.80	2.86	2.96	0.07	-	-	0.11	0.44	2.91
Total	2.36	33.10	1.28	1,084.40	92.80	21.48	136.79	14.73	9.71	1.36	2.43	1.03	1.52	10.06	27.73

Tableau 40 : Gisements des potentiels des énergies renouvelables de la région SUD PACA

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'outil retenu pour la construction du modèle Times SUD PACA, en précisant la formulation mathématique sur lequel il repose et ses caractéristiques techniques et économiques. Le panorama énergétique de la région a servi de base à la construction du modèle et des scénarios à analyser et a été complété par les différents potentiels énergétiques que la région pourrait exploiter pour atteindre ses objectifs de transition énergétique et écologique.

Ainsi, l'explication, étape par étape, de la manière dont nous avons procédé pour construire le modèle ainsi que la description du système énergétique de référence et des solutions technologiques futures possibles, nous permettent de mieux percevoir les évolutions qui s'offrent à la région SUD PACA pour répondre à ses engagements énergie-climat. Dans la section suivante, nous allons présenter les scénarios que nous avons construits pour discuter sur les possibles trajectoires d'évolution possible de la région. Nous analyserons ensuite ces différentes perspectives et discuterons comment le système énergétique de la région pourrait évoluer, notamment en visant la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Chapitre 5 – Prospective des transitions énergétique et d'économie circulaire de la région SUD PACA

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les scénarios de transition que nous voulons analyser avec l'aide du modèle d'aide à la prise de décisions TIMES SUD PACA que nous avons construit dans le chapitre précédent. Nous détaillerons en particulier les différentes hypothèses retenues pour la construction de chaque scénario. Ensuite, nous analyserons les résultats obtenus et chercherons à répondre aux questions suivantes :

- 1) Quelle est la meilleure option pour concilier des zones à forte et faible consommation ?
- 2) Comment et où développer les énergies renouvelables ? ;
- 3) Est-ce que la mise en œuvre d'une perspective d'économie circulaire peut faciliter une transition énergétique au niveau de la région ? ;
- 4) Quel rôle pour les technologies P2G dans le déploiement des technologies renouvelables intermittentes ?
- 5) Une autonomie énergétique de la région SUD PACA est-elle possible ?
- 6) Quelles sont les politiques à mettre sur place pour une transition énergétique du système énergétique régional ?
- 7) Quelles trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre pour la région ?
- 8) Recommandations de politiques pour le développement du système énergétique régional

Finalement, nous ferons des analyses de sensibilité. Pour cela, nous construirons un nouveau scénario pour analyser les politiques recommandés. Ce scénario sera analysé de manière différenciée au regard d'une part, d'un taux d'actualisation plus important, de 8 %, et d'autre part, d'une variation de la demande qui suit de facteurs de variation étudiés pendant la crise sanitaire relative au COVID-19.

5.1. Construction de scénarios pour une stratégie régionale de transitions

Cela fait déjà plus de 70 ans depuis les premiers avertissements scientifiques sur l'effet des activités humaines sur l'environnement, la surexploitation des ressources et l'impact des gaz à effet de serre sur le climat, en réponse auxquels la Communauté internationale a pris divers engagements qui ont abouti en 2015 à l'adoption de l'Accord de Paris. Ce dernier représente la réponse internationale à la menace du changement climatique et de ses effets et vise, en ce sens, à maintenir la hausse de la température mondiale à un niveau bien inférieur à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels tout en poursuivant les efforts pour la limiter à 1,5°C. Pour y parvenir, une transition énergétique bas carbone s'avère nécessaire, en réduisant notamment fortement la dépendance des états aux énergies fossiles, très émettrices de CO₂. Cette transition nécessite une plus forte implication des gouvernements et, plus largement, de la société car, contrairement aux transitions énergétiques passées qui se sont principalement appuyées sur des technologies plus performantes d'un point de vue économique (par exemple, le charbon et le pétrole en remplacement de la biomasse), la transition énergétique actuelle demande l'utilisation de solutions qui limitent l'impact sur l'environnement mais ne présentent pas nécessairement d'intérêt économique sur le court terme (Millot, 2020).

Dans ce contexte, plusieurs pays se sont engagés sur des objectifs ciblant une réduction de leur dépendance aux énergies fossiles et l'atteinte de la neutralité carbone, comme la Chine, l'Union européenne, le Japon, la Corée du Sud ou encore la Nouvelle Zélande. La France s'est également fixé une trajectoire de neutralité carbone à l'horizon 2050 avec une économie plus responsable envers l'environnement et la mise en place d'une économie circulaire. Ces objectifs ne pourront cependant être atteints sans la participation des collectivités territoriales, échelle déterminante pour pousser vers la transition énergétique et la durabilité : notamment celles-ci sont à proximité des consommateurs et peuvent favoriser une interaction plus étroite entre différents acteurs en faveur du développement de ressources énergétiques renouvelables disponibles localement. De plus, elles peuvent développer la coopération entre les acteurs et créer des dynamiques collectives locales, mais aussi déployer des synergies entre différents domaines comme l'urbanisme, le transport et le logement, dont elles ont la compétence, pour mettre en œuvre une transition énergétique plus rapidement (F. Poupeau, 2010).

La France a depuis déjà deux décennies commencé la déclinaison vers ses territoires de ses politiques énergétiques et climatiques. Elle a atteint une étape importante en 2015 avec la LTCEV, cette dernière intégrant les collectivités locales dans la définition des politiques et des objectifs. La région SUD PACA a ainsi redéfini en 2019 ses objectifs énergétiques en proposant un scénario neutre en carbone en 2050. Ces objectifs ne consistent qu'en une trajectoire pour amener la région vers la neutralité carbone et il existe de nombreux choix pour réaliser une transition énergétique bas carbone. Dans cette optique, nous voulons analyser ces diverses trajectoires à travers plusieurs scénarios auxquels nous soumettrons notre modèle TIMES SUD PACA.

Les scénarios que nous envisageons sont ainsi :

- **Référence (Réf)** : ou de base, cible l'analyse du système énergétique en fonction des tendances observées au cours des années passées. Ce scénario sert de référentiel pour le développement des autres scénarios car il donne le contexte d'évolution des différents types d'énergie.
- **SRADDET (SR)** : exprime les objectifs que se fixe la région SUD PACA dans le cadre de son SRADDET et cherche à analyser comment ils peuvent contribuer à arriver à la neutralité carbone
- **Economie circulaire (circularité-EC)** : pour explorer comment une perspective d'économie circulaire pourrait faciliter la mise en œuvre d'un système énergétique bas carbone
- **Neutralité carbone (neutralité-NC)** : pour évaluer une déclinaison des orientations de politiques publiques établies dans la SNBC, en particulier en prenant en compte le budget carbone et une augmentation de l'électrification du secteur industriel
- **Hydrogène (HG)** : Favorise la production et la consommation d'hydrogène, pour regarder le rôle que les technologies power-to-gas peuvent avoir dans le territoire
- **Autonomie (AUT)** : pour explorer une possible autonomie du système énergétique régionale

Les sections suivantes apporteront une présentation détaillée du contexte et des hypothèses posées dans chaque scénario. Un résumé récapitulatif de ces dernières est proposé dans le Tableau 47.

5.1.1 Scénario de référence (Ref)

Ce premier scénario, appelé *scénario de référence*, s'appuie sur les tendances observées passées et prend en compte les actions que la région a décidé, jusqu'à 2017, de mettre en œuvre et qui impacte

directement le secteur énergétique régional. Autrement dit, les objectifs fixés dans le Plan Climat Air Energie Territorial de la région (Région SUD, 2017b) ont été considérés dans ce scénario. Nous considérons que les effets des politiques énergétiques de la région depuis 2005 sont visibles dans les données de consommation des dix dernières années. Pour autant, nous n'avons pas pris en compte les objectifs de la région détaillés dans le SRCAE car, dans le bilan de ce schéma publié en 2018, il est noté que la région est loin d'atteindre la plupart de ses objectifs, (Région SUD, 2018b). Ce scénario reflète aussi finalement la faible contribution aux enjeux climatiques des acteurs politiques et économiques de la région SUD PACA, ce qui est d'ailleurs pointé par le Haut Conseil pour le Climat, « *les acteurs politiques et économiques n'apparaissent pas encore suffisamment sensibilisés au sujet [d'appropriation des enjeux climatiques]* » et les objectifs ambitieux déclarés dans le SRADDET apparaissent « *comme une déclaration d'intention relevant d'une logique d'affichage, mais sans véritables engagements concrets* » (Haut Conseil Pour le Climat, 2020). Enfin, dans cette logique, nous n'avons pas non plus intégré dans ce scénario de référence les objectifs du SNBC et de la PPE, ni du plan national hydrogène et du Plan Régional d'hydrogène.

Ce scénario permet donc d'étudier la trajectoire que la région pourrait suivre si elle continue avec ce niveau d'ambition face aux enjeux énergie-climat, tel qu'il ressort dans les années précédentes et dans le bilan suivant présenté en 2019 du plan climat de la région SUD PACA (Région SUD, 2019). Ce scénario n'est ainsi pas très ambitieux dans les objectifs de décarbonation et met en évidence les énormes efforts à faire pour parvenir à une transition énergétique bas carbone voire une économie circulaire. Il sert de base à la construction d'autres scénarios et pour définir des actions à mettre en place pour guider la région plus efficacement.

Production

Pour le scénario de référence, la production d'électricité et de chaleur utilisant des énergies fossiles est contrainte uniquement à l'année de base³⁸, il est donc possible que la trajectoire calculée substitue les centrales fossiles en fin de vie, sauf pour la centrale à charbon de Gardanne dont la fermeture était déjà programmée pour 2023. Cela permettra de faire des comparaisons avec d'autres scénarios et de regarder quelles énergies peuvent se substituer à l'utilisation des énergies fossiles.

L'hydrogène et les autres technologies *power-to-gas* pourront être développés dans ce scénario dans

Encadré 1 : Les principaux projets Power to gaz de la région SUD PACA

Jupiter 1000 : Situé à Fos-sur-Mer, ce projet démonstrateur cherche à injecter de l'hydrogène et du méthane de synthèse dans le réseau gazier. L'hydrogène est produit par des électrolyseurs avec une puissance de 1 MW (0.5 MW Alcalin et 0.5 MW PEM*) qui profiteront de la production électrique des énergies renouvelables. Le CO₂ sera capté des cheminées industrielles du site. En 2020, l'électrolyseur Alcalin a été mis en service et celle de l'électrolyseur PEM et de la méthanation est envisagée pour 2021.

Hygreen Provence : Ce projet cherche à valoriser la production électrique renouvelable issue des panneaux photovoltaïques à travers la production et le stockage d'hydrogène. Ce projet sera développé en différentes étapes avec des jalons en 2023, 2027 et 2030. Ces échéances verront la capacité des électrolyseurs passer de 12 MW en 2023, à 130 MW puis 435 MW. La production d'hydrogène pourra être stockée dans une cavité saline de 250 000 m³.

Valhydate : Ce projet démonstrateur provient d'une démarche qui cherche à valoriser l'hydrogène fatal produit par les industries situées sur la zone de Fos-sur-Mer. Ce projet envisage une production de 7500 t d'hydrogène/an (La Provence, 2019).

HynoVAR : lancé par la Chambre de Commerce et de l'Industrie (CCI) du Var et par ENGIE, cette initiative a comme ambition de développer l'hydrogène vert pour pousser la mise en place de la mobilité propre. Ce projet est constitué de deux briques. La première développe une unité de production d'hydrogène vert dans la zone de Toulon pour la consommation d'un bateau touristique et de 7 bus (2 à court terme et 5 à long terme). Pour cela, il est envisagé une infrastructure de production de 404 kg/jour. La deuxième brique a comme objectif d'alimenter une flotte de 10 véhicules utilitaires à court terme et 10 à long terme avec une production de 20 kg/jour (CCI VAR, 2019). La première étape est déjà opérationnelle en 2021.

HyAMMED : Ce projet envisage pour 2022 le développement de la mobilité propre à travers la mise en œuvre de 8 poids lourds à hydrogène dans la zone de Fos-Sur-Mer. Ils seront alimentés par une station qui produira 1 tonne d'hydrogène par jour.

*Proton Exchange Membrane

la mesure où la région SUD PACA soutient depuis plusieurs années le développement de ces technologies, et où plusieurs projets de démonstration sont actuellement en cours de développement (Région SUD, 2017b). Nous ajoutons cependant certaines contraintes de sorte que le développement des filières hydrogène et P2G suive les projets existants et prévus dans la région (Encadré 1). La production de l'éolien en mer n'est pas mise à contribution dans le scénario de référence, de même que les technologies utilisant la force marémotrice. Le stockage d'électricité reste limité à 15 % de la

³⁸ La sortie progressive des énergies fossiles est en effet établie par la loi énergie-climat de 2019, qui n'est pas intégrée dans le scénario de référence car nous ne prenons en compte dans ce scénario que les actions mises en place avant 2017.

production solaire envisagée en 2050. Ce stockage n'est possible qu'à travers de batteries neuves et non de seconde vie.

Les dix dernières années, la production d'électricité provenant de sources renouvelables a crû pour tous les différents types d'énergies, mais la part d'énergies renouvelables n'a pas changé depuis 2010 et ne couvre qu'en moyenne 10 % de la consommation. Dans le cas de la production provenant des ressources solaires, la puissance installée a augmenté en moyenne de 11,6 % par an depuis 2012. Si nous continuons avec cette tendance, la production solaire en 2050 pourrait couvrir 25 % de la consommation énergétique de la région de 2017, ce qui représente une exploitation d'environ 85 % des potentiels solaires sur toiture et au sol sous « enjeu fort » et « sans enjeu ». Nous prenons donc comme hypothèse que la production solaire peut augmenter jusqu'à un niveau entre *a minima* 27 PJ (ce qui correspond à 5 % de croissance annuelle) et *a maxima* 127 PJ (soit 10 % de croissance annuelle).

Dans le cas de la production éolienne terrestre, le taux de croissance considéré est faible car la réponse sociale envers ce type d'énergies est plutôt négative et les démarches administratives associées sont trop compliquées et longues (environ sept ans pour obtenir un permis). En outre, le Schéma Régional Eolien a été annulé par le Tribunal Administratif de Marseille au motif qu'il n'avait pas été soumis à évaluation environnementale, ce qui a singulièrement empêché son évolution (International Energy Agency, 2017; Région SUD, 2018a). Nous considérons donc que la production éolienne évoluera au maximum de 2 % par an.

Concernant la production hydraulique, nous avons regardé que malgré une augmentation de 1 % de la puissance installée de centrales hydraulique en 2017 par rapport à 2007, sa production électrique a diminué de -1 % pendant la même période. Cela s'explique principalement à la variabilité des précipitations dans la région (Région SUD, 2018a). La capacité installée pour l'hydroélectricité est restée constante pendant la dernière décennie avec 3.2 GW car son potentiel est presque épuisé. Concernant la petite hydroélectricité sa capacité installée a augmenté de 5 % pendant la même période. De cette façon nous considérons que la production de cette énergie peut avoir un niveau de production minimal similaire à l'année de base et en 2050 elle peut atteindre une production de 35PJ ce qui correspond à la production moyenne de dix dernières années.

Dans le cas de la valorisation des déchets pour produire de l'énergie, on peut constater une augmentation moyenne de la production des déchets ménagers et assimilés de 0,5 % par an et d'environ 2 % pour les déchets d'activités économiques. Si cette tendance se poursuit jusqu'à l'horizon 2050, la production pourrait atteindre environ 9 Mt contre 5 Mt en 2017 et l'installation de nouvelles capacités serait nécessaire pour pouvoir valoriser énergétiquement les déchets produits. La région SUD PACA affiche un fort soutien aux actions de prévention et de gestion de déchets dans son plan climat de 2017, ces dernières pouvant avoir un impact direct sur les matériaux disponibles pour une valorisation énergétique, la priorité étant fixée sur l'utilisation des matériaux plutôt que leur incinération. Pour autant ces objectifs sont davantage qualitatifs que quantitatifs, ce qui ne permet pas de déterminer clairement comment ils pourraient affecter le secteur du traitement des déchets. Nous avons donc posé comme hypothèse pour la valorisation des déchets une production minimale similaire à celle de l'année de base et une production additionnelle maximale de 50 % par rapport à celle observée dans l'année de base. L'énergie livrée par les réseaux de chaleur peut suivre une croissance de 3 % par an en raison de la croissance importante de la filière les dernier 10 années et du

au soutien de la région pour cette technologie dans le cadre de son PCAET régional de 2017 (Région SUD, 2019).

La production de biogaz a connu un fort développement en France ces dernières années, mais un développement moins marqué dans la région SUD PACA. La puissance installée est passée de 9 MW en 2007 à 34 MW en 2017. Dans le scénario de référence, nous considérons donc que la puissance installée des centrales de production d'électricité et de chaleur utilisant du biogaz sera au maximum multiplié par 4 en 2050 par rapport à 2017, soit 140 MW.

	Energie	2017 (PJ)	Limite	Croissance annuelle	2050 (PJ)	2050/2017
Électricité	Biogaz	0.84	UP	6%	4.90	485%
			LO	1%	1.16	39%
	Biomasse	1.43	UP	2%	2.75	92%
			LO	0%	1.43	0%
	Éolien	0.42	UP	2%	0.81	92%
			LO	1%	0.59	39%
	Hydroélectricité	28.65	UP	1%	35.00	22%
			LO	0%	29.13	2%
Déchets Ménagers (VE)	1.53	UP	1%	2.30	50%	
		LO	0%	1.53	0%	
Solaire photovoltaïque	5.51	UP	10%	127.97	2223%	
		LO	5%	27.57	400%	
Fossile	35.54	UP	0%	35.54	0%	
Thermique	Biomasse	9.92	UP	1%	14.43	39%
			LO	0%	10.39	0%
	Pompes à chaleur	17.00	UP	5%	32.68	92%
			LO	1%	23.61	39%
	Réseaux de chaleur	1.43	UP	2%	5.22	265%
			LO	1%	1.43	0%
Solaire thermique	0.64	UP	5.00%	3.19	400%	
		LO	1%	0.88	39%	
Fossile	2.32	UP	0%	2.32	0%	
TOTAL	Électrique	73.93	UP		209.27	184%
			LO		96.95	89%
	Thermique	28.99	UP		57.18	113%
			LO		38.16	22%

Tableau 41 : Hypothèse de développement pour la production énergétique

La filière bois pour la production d'électricité n'a pas reçu de fort support politique de la part de la région et l'utilisation du bois pour la production d'électricité ne représente que 2 % de la production électrique totale de la région. Cette production provient à 50 % de la centrale de Brignoles (VAR1) qui a été mise en fonctionnement en 2016, le reste de la production vient des centrales de Tarascon (BDR2) et de Gardanne³⁹. À l'avenir, le soutien ne change pas *a priori*. Tenant compte de cela, la production électrique basée sur le bois reste constante sur toute la période.

³⁹ La tranche 5 de la centrale de Gardanne fonctionnant dans un premier temps à charbon a été convertie pour pouvoir utiliser du bois.

La filière bois pour la production de chaleur montre quant à elle une tendance complètement différente de celle du secteur électrique, puisque le bois représente 16 % de la production de chaleur pour les secteurs résidentiel et tertiaire. Bien que sa consommation ait augmenté de 30 % entre 2007 et 2017, ce niveau est resté relativement constant à 9 PJ depuis 2010. L'utilisation du bois comme énergie recevant un soutien plus marqué de la part de la région, une augmentation de l'utilisation du bois de 1 % par an jusqu'à 2050 semble raisonnable, ce qui conduirait à une consommation possible en 2050 de 13 PJ.

Concernant les pompes à chaleur, pour la géothermie, la perspective est un peu plus pessimiste : leur acceptation dans la région est faible, les ventes régionales de ce genre de PAC sont à la baisse et ne représentent que 3 % du total national en 2017 (Observ'ER-Observatoire des énergies renouvelables, 2018). Leur production jusque 2050 est ainsi fixée à hauteur d'au moins celle de l'année de base (1 PJ) avec une limite de production de 5 PJ, ce qui représente 3 % des objectifs établis par l'ADEME dans sa vision 2030-2050 (ADEME, 2015). Nous prenons comme base dans notre modèle la vision ADEME en raison de l'absence d'objectifs nationaux spécifiques concernant cette ressource à l'horizon 2050.

Les PACs aérothermiques sont en revanche largement acceptées tant au niveau national qu'à celui de la région SUD PACA. Leur développement suivra la tendance observée les années passées, avec un déploiement de 53 600 unités/an en moyenne soit 0,20 GW/an. Cette production servira à couvrir une partie des besoins d'eau chaude, de climatisation et/ou de chauffage dans le secteur résidentiel et tertiaire. Le choix précis des technologies revient au modèle. Enfin, pour le déploiement du solaire thermique, les tendances d'acceptation de cette filière étant importantes, leur production pourra monter jusqu'à 3 PJ en 2050, soit une croissance annuelle de 5 %.

Les réseaux gazier et électrique

Gaz

Tout d'abord, nous considérons que la région SUD PACA pourra utiliser 10 % de plus de gaz pour satisfaire ces usages énergétiques, la tendance ayant été à la hausse les années passées. En outre, la production de biogaz en France pour injection dans le réseau gazier français a subi une forte augmentation ces dernières années, passant d'une capacité de 279 GWh en 2015 à 2 157 GWh en 2019. Ces importants développements montrent l'intérêt croissant pour la filière (GRDF, 2019). Dans la région SUD PACA, les premiers projets d'injection du biogaz ont vu le jour en 2019 avec une capacité maximale de production de 47 GWh (0.17 PJ) par an. Les développements attendus de la filière dans le pays sont en général optimistes : en effet, la capacité réservée en file d'attente⁴⁰ ayant atteint en 2017, 8 TWh de production du biogaz renouvelable (correspondant aux objectifs prévus dans la première version de la PPE pour 2023), ces objectifs ont été portés à 14 TWh pour 2023 et entre 24 et 32 TWh pour 2028. Dans la région SUD PACA, il n'y avait pas de centrales de production du biométhane en 2017, cependant les projets dans la file d'attente atteignaient alors une production annuelle de 0,6 PJ/an (soit 189 GWh/an), les perspectives de développement de la filière sont donc optimistes, même si son développement reste tardif dans la région en comparaison avec les autres territoires

⁴⁰ Pour GRTgaz, un projet est intégré dans la file d'attente de raccordement lorsqu'il atteint la commande de l'étude de phase II, c'est-à-dire l'étude de faisabilité pour les réseaux de transports (GRT) et l'étude détaillée pour les réseaux de distribution (GRD). À ce stade, un projet mettra 2 à 5 ans pour être mené à terme. La phase II correspond aux études à réaliser par le gestionnaire du réseau de distribution pour connaître les débits de biométhane qui pourront être injectés. Les projets sortiront de la file d'attente une fois l'installation entrée en service (GRTgaz, 2017).

français. Il n’y a pas d’objectifs régionaux ciblant le développement de la filière biogaz pour injection. Pour la région, au minimum 20 % du gaz provenant du réseau gazier français a la possibilité d’être renouvelable. La production régionale en 2050 sera donc *a priori* supérieure à 10 % de la consommation de gaz de 2017. La consommation du biométhane pour les différents secteurs pourrait monter en 2020 jusqu’à 1 % de la consommation de gaz naturel en 2017 et à 20 % en 2050. Cette hypothèse a été validée par avis d’experts.

Electricité

La région SUD PACA a soutiré en moyenne 52 % de l’électricité qu’elle consomme entre 2010 et 2017 et a montré une réduction de l’électricité soutirée de 19 % pendant la même période (Figure 26). La prévision pour la production électrique de la région est à la hausse et une réduction des soutirages électriques du réseau est envisagée pour les prochaines années. La réduction moyenne par an de la consommation par la région PACA d’électricité provenant du reste de la France est de 3 %. Pour autant, nous ne voulons pas trop contraindre l’utilisation de cette ressource car cela permettra de mettre en compétition la production locale avec l’électricité produite en-dehors de la région. Par conséquent, pour la période 2050, nous prenons comme hypothèse de réduire les niveaux d’importations de 0,5 % par an, ce qui donne une consommation de 15 % plus basse de l’électricité provenant du réseau électrique en 2050 par rapport à 2017.

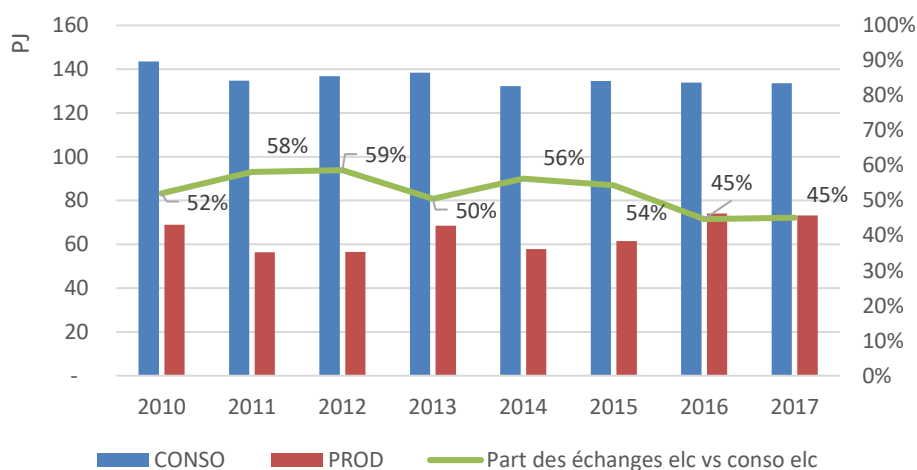


Figure 26 : Consommation électrique, production locale et soutirage d’électricité du réseau électrique français

Demande

Résidentiel-tertiaire

Les principales hypothèses concernant ce secteur portent sur la rénovation des bâtiments. Tout d’abord, les potentiels d’économie d’énergie liée à la rénovation du parc immobilier sont le résultat du calcul de la différence entre la consommation par m² des bâtiments existants et ce qu’ils devraient consommer selon les spécifications détaillées auparavant (12 kWh/m²/an pour les bâtiments résidentiels et 35 kWh/m²/an pour les bâtiments tertiaires). Cette méthode de calcul est celle utilisée par (Carbone 4, 2014), et il apparaît d’autant plus pertinent de l’utiliser ici que la dernière étude estimant ce potentiel pour la région SUD PACA date de 2011 et utilise comme année de référence le parc existant en 2006 (Energie Demain, 2011), il n’est donc pas possible de l’utiliser dans notre modèle.

Plusieurs travaux de rénovation ont depuis été développés et aucun suivi ne permet aujourd’hui d’identifier comment ces rénovations ont impacté la consommation énergétique et le potentiel restant à mobiliser (Région SUD, 2018a). Même s’il y a un suivi des différents dispositifs incitatifs (CERC PACA, 2020), cela ne permet pas de regarder les effets de chaque action de rénovation, c’est-à-dire qu’il n’est pas possible d’identifier les économies d’énergies dues aux travaux dans les bâtiments ou aux changements des systèmes (par exemple, l’utilisation d’un système de chauffage plus performant).

Les potentiels de rénovation des bâtiments considérés sont présentés dans le Tableau 42.

PJ	Résidentiel			Tertiaire		
	Consommation chauffage 2017	Consommation avec la nouvelle RT	Potentiel d'économie d'énergies	Consommation chauffage 2017	Consommation avec la nouvelle RT	Potentiel d'économie d'énergies
AHP	1.88	0.42	1.46	0.58	0.27	0.30
HA	2.51	0.42	2.09	0.82	0.30	0.52
AM1	6.13	2.27	3.86	3.11	2.02	1.09
AM2	0.64	0.17	0.48	0.14	0.09	0.05
BDR1	18.83	3.32	15.51	9.17	3.51	5.67
BDR2	1.20	0.38	0.83	0.48	0.18	0.29
VAR1	5.00	2.25	2.75	2.19	1.49	0.70
VAR2	1.02	0.32	0.71	0.19	0.13	0.06
VAUC	4.09	1.17	2.92	1.70	0.93	0.77
Total	41.31	10.71	30.60	18.37	8.92	9.45

Tableau 42 : Potentiels d'économie d'énergies pour la rénovation des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire

Depuis 2005, la région a mis en œuvre divers dispositifs incitant à la rénovation des bâtiments mais les objectifs n’ont pas été atteints. Selon le bilan du SRCAE, la région achève la rénovation d’environ 15 000 logements annuels, ce qui correspond à 30 % des objectifs établis par an. Pour le scénario de référence, nous considérons donc que la région pourra mobiliser 50 % du potentiel en 2050 pour le secteur résidentiel dans les zones à forte consommation, et 40 % dans les zones à faible consommation. Cette différenciation est faite car, dans les zones à faible consommation, la consommation du chauffage a augmenté pendant les dix dernières années, tandis qu’elle baissait dans les zones littorales (correspondant à une diminution des besoins de chauffage de 53 %). Pour le secteur tertiaire, nous supposons qu’il y aura une mobilisation de 30 % du potentiel en 2050 pour toutes les branches sauf pour les commerces et l’enseignement qui mobilisent 20 % du potentiel, ce qui réduira la consommation de 29 %. Cette différenciation suit une logique similaire à celle du secteur résidentiel. Enfin, nous considérons que la part de l’électricité dans les différents postes de consommation reste constante pendant toute la période⁴¹.

D’autres actions pour réduire la demande, comme une meilleure prise de conscience des consommateurs (associée à la formation des citoyens) ou des changements de comportements ou de modes de vie, ne sont pas pris en compte. La prise en compte de ce genre de variables laisse l’opportunité de construire et analyser plusieurs autres scénarios (Le Gallic, 2018), dont l’étude ne fait pas l’objet de ce travail de thèse.

⁴¹ Nous ne prenons pas en compte des changements de comportement en termes de consommation énergétique ou des changements dans les modes de vie d’habitant de la région SUD PACA pour le secteur résidentiel.

Transport

Pour le secteur du transport, le gaz naturel représentera au minimum 15 % de la consommation énergétique des poids lourds et des bus, et 20 % de celle des véhicules particuliers au vu de la tendance à l'introduction du GNV dans ce genre de véhicules.

L'acceptation des véhicules électriques a crû ces dernières années et le plan climat de la région envisage un soutien pour le développement des infrastructures au niveau de la recharge des véhicules électriques (Région SUD, 2017b). En ce sens, la part des véhicules électriques pourra atteindre jusqu'à 20 % du total des véhicules en 2050 dans les zones à faible consommation et jusqu'à 30 % dans les zones à forte consommation. L'augmentation de la proportion des véhicules électriques suit ainsi les efforts de la région pour le déploiement des bornes de recharge et d'autres initiatives intégrées dans le plan climat de la région SUD (Région SUD, 2017b, 2019).

Dans la perspective de prise en compte d'un report modal, à l'horizon 2050, nous fixons comme hypothèse que les véhicules à mobilité individuelle ne pourront couvrir qu'au maximum 5 % des déplacements des véhicules particuliers. Pour les zones à faible consommation, cette couverture peut être assurée à hauteur de 10% par des trottinettes et le reste par les Vélo à assistance électrique (VAE). Dans les zones à forte consommation, la part des trottinettes peut monter jusqu'à 30 %. En outre, les bus pourront représenter 6 % des passagers/km des véhicules particuliers en 2050. Ces hypothèses reflètent les actions de la région établies dans son plan climat (Région SUD, 2017b, 2019). Dans ce scénario, le nombre de personnes par véhicule particulier est maintenu stable avec 1,2 personne par véhicule, de même pour les tonnes par véhicules pour le fret fixées au niveau de l'année de base.

Pour finir, la consommation du biofuel ne pourra qu'au maximum doubler d'ici 2050, c'est-à-dire qu'il ne sera possible d'utiliser au maximum que 20 PJ pour couvrir une partie de la demande énergétique du secteur de transport. Cette hypothèse sera appliquée à tous les scénarios.

Industrie

Pour le secteur industriel, la principale hypothèse est de conserver la part de l'électricité constante dans la consommation final d'énergie dans le secteur, pour chaque type d'activité et par procédé, sauf pour le secteur de la sidérurgie et du ciment.

5.1.2. Scénario SRADDET (SR)

Le second scénario développé, appelé *scénario SRADDET*, exprime les objectifs que se fixe la région SUD PACA dans le cadre de son SRADDET, Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires, qui précise la stratégie de la Région pour 2030 et 2050.

Le Schéma de la région vise à atteindre la neutralité carbone et pour cela, précise que ce ne sera possible qu'à travers la réduction de la demande finale d'énergie de 30 % et une augmentation de la production d'énergies renouvelables locales (voir Tableau 43).

Ainsi, en premier lieu, comme envisagé dans le cadre de la loi énergie-climat de 2019, une sortie progressive des énergies fossiles pour la production d'électricité est prévue et aucune nouvelle installation utilisant ces ressources ne peut être opérée pour la production d'électricité. La consommation de l'électricité provenant du réseau électrique français est réduite de 50 % en 2050. Le stockage en batterie aura une capacité de 4 500 GWh, soit 16 PJ, selon les objectifs du SRADDET, ce qui représente 5 % de la production électrique ciblée en 2050.

PRODUCTION (PJ)		2012	2021	2023	2026	2030	2050
ÉLECTRICITÉ	Hydroélectricité	32.652	32.652	32.652	32.652	32.652	34.952
	Éolien terrestre	0.418	2.984	3.557	4.421	5.569	10.800
	Éolien flottant	-	3.427	4.187	8.564	14.400	28.800
	PV-Particuliers (<3kW)	2.426	1.508	1.800	2.045	2.387	13.522
	PV-Parcs au sol		-	12.391	12.715	13.144	58.939
	PV-Grandes toitures (>3kW)		-	24.152	30.323	38.552	143.622
	Grandes centrales biomasse	-	3.802	4.648	4.648	4.648	4.648
THERMIQUE	Récupération de chaleur	11.178	25.632	28.843	33.671	40.104	72.209
	Solaire thermique collectif	0.292	1.937	2.304	2.894	3.683	7.452
	Bois énergie collectif	0.752	1.645	1.843	2.254	2.804	5.108
	Méthanisation	0.378	1.919	2.261	4.378	7.200	14.778
	Gazéification	-	1.472	1.800	4.115	7.200	15.196
	Biomasse agricole (hors méthanisation)	-	1.267	1.548	1.962	2.513	5.317
TOTAL Général		48.096	108.270	121.986	144.641	174.856	415.343
TOTAL Électrique		35.496	74.398	83.387	95.368	111.352	295.283
TOTAL Thermique		12.600	33.872	38.599	49.273	63.504	120.060
Taux de couverture de la consommation d'énergie finale		6%		19%	25%	32%	110%

Tableau 43 : Objectifs de production d'électricité et de chaleur SRADDET

La filière de récupération de chaleur comprend différentes technologies, à savoir la géothermie, la chaleur ambiante, la chaleur fatale. Pour son développement nous prenons donc différents hypothèses :

- Le potentiel d'installation de la géothermie est deux fois plus important que celui fixé dans le scénario de référence.
- Le potentiel d'installation des pompes à chaleur est 10 % plus important que celui fixé dans le scénario de référence

La récupération de chaleur peut avoir une production à hauteur de 30 PJ ; 10 PJ pourront être utilisées par l'industrie et 20 PJ par le secteur de l'habitat

En outre, nous intégrons les projets de décarbonation visés par l'usine de production de ciment située dans les Alpes-Maritimes (VICAT), lesquels envisagent d'intégrer la capture du carbone dans leur

procédé de production. Cette hypothèse sera également considérée dans les autres scénarios énergie-climat.

Enfin, les différentes hypothèses relatives au SRADDET et fixées dans ce scénario sont détaillées dans le Tableau 43.

Les hypothèses concernant le développement de la filière hydrogène posées dans ce scénario, en-dehors du développement des projets P2G précédemment cités, intègrent les objectifs établis dans le cadre du Plan Hydrogène de la région SUD PACA (Region SUD, 2020). Elles sont présentés dans le tableau suivant :

Filière	2027	2032
Poids lourds (unités)	100	630
Véhicules utilitaires (unités)	540	2 280
Bus -autocars (unités)	86	260
Production H ₂ (tH ₂ /an)	16 000	28 800
Injection au réseau gazier (t H ₂ /an)	3 000	5 400

Tableau 44 : Objectifs proposés dans le cadre du Plan régional Hydrogène de la région SUD PACA

Pour accompagner la réduction de la consommation énergétique de la région, les potentiels de rénovation thermique des bâtiments sont considérés comme réalisés à 100 % tant pour le secteur résidentiel que pour le tertiaire. En outre, dans le secteur résidentiel, 25 % des chauffages au fioul sont considérés comme remplacés par le gaz naturel ou le biogaz en 2030 et 100 % en 2050. Le bois quant à lui couvrira 10 % des besoins de chauffage. Dans le secteur tertiaire, il n’y aura pas de consommation de fioul pour le chauffage et une hypothèse de réduction progressive de la consommation des énergies fossiles est posée. Enfin, en 2050, la consommation de biogaz sera d’au moins 50 % de la consommation du gaz en 2017.

Dans le secteur du transport, tout d’abord, les véhicules particuliers transporteront 1,35 personne en moyenne en 2030 puis 1.5 en 2050. Le report modal des véhicules à mobilité individuelle en 2050 peut augmenter à hauteur de 9 % de la consommation de véhicules particuliers dans les zones à faible consommation et à 12 % dans les zones à forte consommation. La part des vélos et trottinettes est similaire à celle détaillée dans le scénario de référence. Les bus dans les zones à faible consommation couvriront 10 % de la demande de mobilité de véhicules particuliers en 2050, ce taux est porté à 20 % dans les zones à forte consommation. De plus, à partir de 2040 il n’y aura plus de nouveaux véhicules particuliers utilisant des énergies fossiles. La part du gaz en 2050 dans le secteur peut augmenter à hauteur de 30 % de la consommation du secteur dans l’année de base.

Pour le secteur industriel, nous avons conservé les hypothèses fixées dans le scénario de référence, en conservant notamment au minimum la part de l’électricité pour chaque activité et procédé.

5.1.3. Scénario Neutralité carbone (neutralité-NC)

Le troisième scénario développé dans le cadre de cette étude est le scénario dit de *neutralité*. Pour la construction de ce scénario, nous avons intégré les hypothèses établies dans le cadre de la SNBC, notamment le budget carbone par secteur (voir Tableau 45).

	2030	2050
Bâtiments	-49 %	-100%
Transport	-28%	-100%
Industrie	-35%	-81%

Tableau 45 : Budget carbone par secteur

Les principales hypothèses pour ce scénario sont :

- Pas de nouvelles centrales de production d'électricité ou de chaleur utilisant des énergies fossiles ou qui sont polluantes.
- L'énergie éolienne peut avoir un développement plus important que dans le scénario de référence. Nous envisageons une croissance de 8 % par an pour la filière, soit une production maximale de 5 PJ en 2050.
- Le gaz naturel dans le mix électrique peut être substitué par du biogaz.
- Les technologies d'énergie marémotrice peuvent être déployées à hauteur de 1 GW.

Pour le secteur de la demande :

- Le taux d'électrification du secteur industriel augmentera à hauteur de 40 % en 2030 et de 70 % en 2050, sauf pour la sidérurgie et le ciment.
- Dans le secteur du transport, le covoiturage augmentera significativement et les passagers par véhicule particulier passeront à 1.5 en 2050. Les bus couvriront en 2050 20 % des déplacements réalisés par les véhicules particuliers dans les zones à forte consommation et 10 % dans les zones à faible consommation. La part modale du VAE passe à 12 % (multiplié par 4) dès 2030 pour les zones à forte consommation et à 9 % pour les zones à faible consommation.
- Le biométhane dans le secteur du transport couvrira au moins 20 % des besoins en gaz disponible pour la consommation du secteur (soit au maximum 30 % de la consommation énergétique du secteur à l'année de base).
- Le niveau de chargement des poids lourds augmente et passe de 9,8 à 12 tonnes par véhicules en 2030.
- Dans le secteur de l'habitat, nous considérons que la récupération de chaleur peut se développer significativement, jusqu'à pouvoir exploiter 80 % des potentiels des réseaux de chaleur de la région (20 PJ). Les pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques pourront se développer davantage que dans le scénario de référence (10 % de plus que le potentiel fixé). En outre, nous considérons dans ce scénario que 80% des bâtiments seront rénovés.

5.1.4. Scénario Hydrogène (SH2)

Ce scénario vise à promouvoir le déploiement de la filière hydrogène comme un moyen de permettre une meilleure intégration des énergies renouvelables variables, dépendant des conditions climatiques, et à accompagner ainsi les plans européens et français pour le déploiement de cette énergie.

Dans cette optique, nous prenons en compte le Plan national Hydrogène qui envisage le déploiement de 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers d'ici 2028. Pour traduire ces objectifs à l'échelle de la région, nous considérons que la région peut déployer 8 % de ces objectifs à l'horizon 2030 (1 600 véhicules), le parc de véhicules utilitaires et lourds de la région représente environ 8 % du parc français. Pour les poids lourds, nous suivons le Plan régional Hydrogène à l'horizon 2030 (Tableau 44). En 2050, nous envisageons qu'au moins 10 % de véhicules utilitaires et poids lourds utiliseront de l'hydrogène. Eu égard au Plan Hydrogène européen, nous considérons l'objectif d'avoir entre 12 et 14% du mix énergétique en 2050 couvert par l'hydrogène, notamment pour couvrir les consommations du secteur du transport. Nous envisageons une production plus importante d'hydrogène en 2050 (50 PJ) soit 10 % de la consommation énergétique de la région en 2017.

Pour accompagner le déploiement de l'hydrogène, d'autres hypothèses sont retenues. D'abord, pour le secteur de la production d'électricité, 100 % des potentiels solaires en toiture et au sol (à « enjeux non identifié » et à « enjeux modéré ») pourront être exploités. Comme pour les précédents scénarios, il ne sera pas possible d'installer de nouvelles centrales électriques utilisant des énergies fossiles. La production éolienne et du biogaz pourra suivre une tendance similaire à celle du scénario de neutralité carbone. Une présentation détaillée des hypothèses utilisées dans ce scénario est proposée dans le Tableau 47.

5.1.5. Scénario Économie circulaire (circularité-EC)

Dans le Chapitre 3 nous avons fait une revue globale de l'Économie circulaire que nous avons cherché à décliner dans le contexte de développement du système énergétique de la région SUD PACA, y compris de sa modélisation. Ainsi, cette vision d'un système énergétique circulaire (SEC) a conduit à reconsidérer l'impact environnemental de l'activité du système énergétique en repensant la façon de consommer et de produire, à travers l'application des 4 R, à savoir « Réduire, Réutiliser, Recycler et Valoriser », en cherchant à toujours à minimiser la consommation des ressources énergétiques, à produire zéro déchet et pollution et en suivant une approche systémique au moment de sa définition et de sa mise en œuvre.

5.1.5.1. Développement d'un Système énergétique circulaire SUD PACA

Ainsi dans le cadre de ce scénario EC SUD PACA, le principe de Réduction implique l'application d'actions visant à augmenter l'efficacité du système, par l'intégration de technologies plus performantes (IEA, 2020b) et de pratiques de consommation plus efficaces, comme le covoiturage (Taranic et al., 2016). Le principe de Réutilisation vise la réintroduction d'un produit dans le système énergétique, comme par exemple en réutilisant les émissions de CO₂ (IEA, 2020c) ou en réutilisant d'autres produits énergétiques comme les batteries des véhicules électriques (Bonsu, 2020). Le principe de Recyclage implique quant à lui l'utilisation de la biomasse, car celle-ci capte le carbone de l'atmosphère lorsqu'elle est cultivée, le libère à nouveau lorsqu'elle est décomposée ou brûlée, et capture à nouveau le carbone lorsque la même quantité de biomasse est cultivée, recyclant ainsi les émissions de carbone (IRENA, 2020b). Enfin, le principe de Récupération s'exprime par la valorisation des ressources considérées comme des déchets car elles ne pourraient pas être réintroduites dans le système économique pour d'autres usages (Morsetto, 2020). L'économie circulaire pousse cependant plus loin ce principe et va au-delà de la simple récupération de matériaux en exigeant également un changement dans la façon dont l'ensemble du système consomme et se comporte (Prieto-Sandoval et al., 2018). En ce sens, notre scénario EC analysera également comment le choix

d'une mobilité plus durable pourra impacter l'évolution du système énergétique. Ces choix consistent notamment à passer à un niveau de remplissage de voiture particulier plus important (covoiturage) et l'utilisation de vélos et trottinettes à assistance électrique. Par conséquent, ce scénario considère qu'un système énergétique circulaire est capable de produire de l'énergie à partir de matériaux et d'énergies (fatales) qui n'ont pas pu être réintégrés à d'autres processus de production. Le scénario EC SUD PACA favorise le développement de solutions renouvelables et durables visant la réduction des émissions polluantes. Une représentation d'un scénario EC SUD PACA est donnée dans la Figure 27.

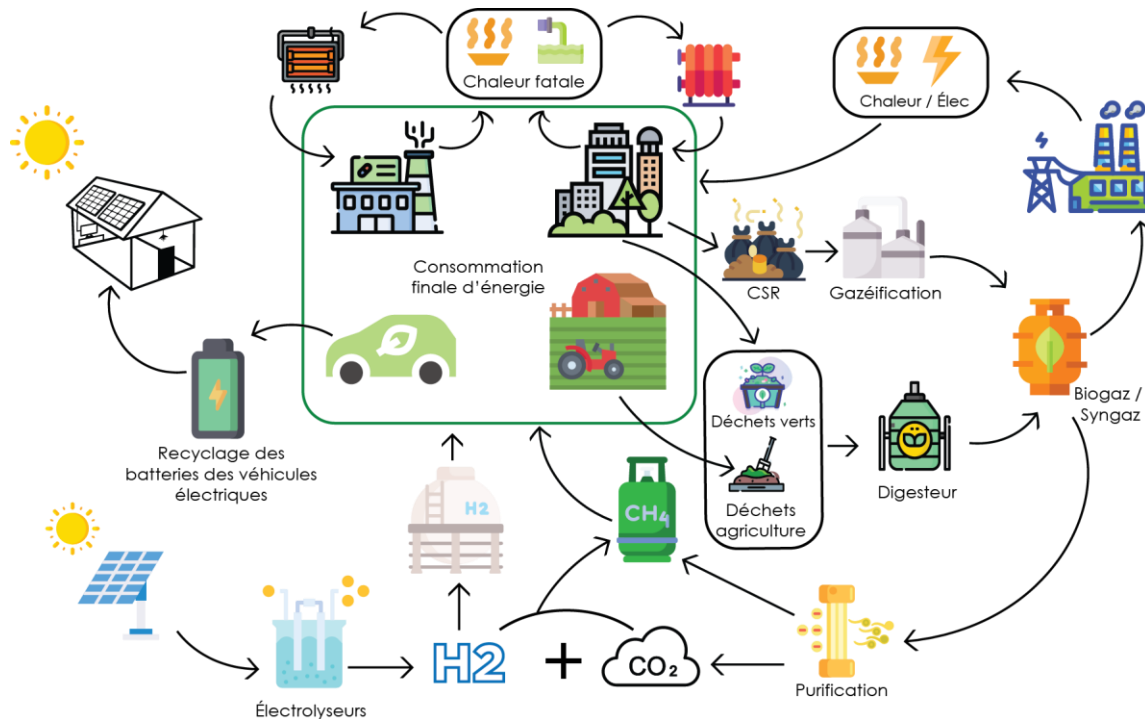


Figure 27 : Vision d'un système énergétique circulaire pour la région SUD PACA

5.1.5.2. Un système énergétique circulaire SUD PACA - hypothèses

Ce scénario cherche ainsi à explorer une transition énergétique sous une perspective d'économie circulaire en mobilisant au maximum la récupération d'énergie et en valorisant les matériaux et les déchets. Un résumé des hypothèses retenues est détaillé dans le Tableau 46.

Nous cherchons donc à récupérer 100 % de la chaleur fatale et de la chaleur provenant des eaux usées en 2050, et pour toutes les zones, à l'exception de BDR1, cette chaleur est principalement utilisée pour couvrir les besoins de chauffage. En outre, comme nous visons également la valorisation des boues de STEP et des déchets (combustibles solides de récupération et déchets municipaux), nous avons posé une contrainte d'exploitation totale de ces potentiels.

Une autre stratégie envisagée dans une transition vers un système énergétique circulaire est la réutilisation des batteries des véhicules électriques. Sur la base des véhicules électriques qui sortent du marché d'après le scénario SRADDET, nous avons estimé une quantité disponible de batteries de seconde vie d'environ 23 000 en 2030 et de 248 500 en 2050. Considérant une capacité moyenne par batterie de 35 kWh (IEA, 2018), le potentiel de batteries est fixé à 20 PJ en 2030 et à 219 PJ en 2050. Nous considérons qu'il sera possible de capter dans un premier temps 10 % de ce potentiel pour pouvoir stocker l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques en toiture.

Objectifs proposés dans un SEC		
100%	Chaleur fatale	
100%	Chaleur d'eaux usées	
100%	Boues	
100%	CSR, déchets agricoles, et déchets verts	
100%	Rénovation des bâtiments	
15%	Captage de carbone	
Personnes par véhicule particulier	1.7	Personne par véhicule
Report modale	Les véhicules à mobilité individuelle peuvent couvrir 20 % de la demande de véhicules particuliers	
Pompes à chaleur	15% plus par rapport au scénario de REF (max 58300 unités par an)	
Energy maritime	3 GW	
Eolien	3 fois le scénario de référence (2,43 PJ)	

Tableau 46 : Principales hypothèses appliquées pour le scénario circularité

De plus, nous envisageons la mobilisation de 100 % du potentiel des déchets municipaux et verts à travers la gazéification et la méthanisation. Le CO₂ issu de la purification et de l'épuration est réutilisé pour produire du biométhane. En outre, à l'horizon 2050, la capture et utilisation du CO₂ se développera dans l'industrie du ciment et la sidérurgie.

Nous voulons aussi intégrer un changement de comportements relatif au choix de mobilité. Ainsi, le taux de remplissage par véhicule augmente dans ce scénario et passe à 1.70 en 2050, la part de vélos à assistance électrique peut monter à hauteur de 20 % en 2050.

Concernant la production d'électricité, il sera impossible de recourir au gaz naturel sauf si la centrale électrique est équipée de technologies de captage du carbone. Dans ce cas, la production maximale est limitée à la moitié de la production de l'année de base. Par contre, le gaz naturel peut être remplacé par du biogaz. L'électricité et le gaz naturel provenant du reste de la France suit la même stratégie que le scénario SRADDET.

5.1.6. Scénario Autonomie

Dans ce scénario, nous cherchons à analyser si la région pourrait couvrir sa consommation énergétique en ne mobilisant que les ressources disponibles localement, et donc être autonome énergétiquement, et nous étudions à quel niveau et comment ce contexte modifie le système énergétique de la région SUD PACA. Ainsi nous posons comme hypothèse de ne plus recourir à l'électricité et le gaz provenant du reste de la France à l'horizon 2050. Il en est de même des produits pétroliers. Les autres hypothèses accompagnant ce scénario sont détaillées dans Tableau 47.

Tableau 47 : Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour le secteur de l'habitat

				Référence		Economie Circulaire		Décarbonation SR		SRADDET		Hydrogène		Autonomie		
HABITAT	Rénovation de bâtiments	Résidentiel	ZFC-	40%	2050	100%	mobilisation de potentiels	80%	mobilisation de potentiels	100%	mobilisation de potentiels	80%	mobilisation de potentiels	80%	mobilisation de potentiels	
			ZFC+	50%	2050	100%		80%		100%		80%				
		Tertiaire	30%	2050	100%	80%		100%		80%						
	Electricité	Cuisson		-SAB	2050	-SAB	2050	-SAB	2050	-SAB	2050	-SAB	2050	-SAB	2050	
		Chauffage ECS		garder la part de l'année de base												
	Biomasse	Chauffage ECS	Résidentiel	max 12PJ	2050	12PJ	2050	13 PJ	2050	13 PJ	2050	13 PJ	2050	13 PJ	2050	
			Tertiaire	max 1 PJ		2 PJ		2 PJ		2 PJ						
	Gaz	Gaz Naturel, Biogaz, Gaz mélangé	Quantité de ressource disponibles - consommation finale	+10%	Par rapport à l'année de base en 2050	+10%	Par rapport à l'année de base	+10%	Par rapport à l'année de base	+10%	Par rapport à l'année de base	+10%	Par rapport à l'année de base	+10%	Par rapport à l'année de base	
			Part du gaz dans la cuisson	La part du gaz peut être réduite de -30%												
		Biogaz	max 20%	Du gaz disponible total pour consommation	peut remplacer la part du gaz naturel											
		Gaz mélangé	max 60%	Du gaz disponible total pour consommation	peut remplacer la part du gaz naturel											
	Biofuel				0%	Peut-être utilisés pour remplacer les usages d'autres usages énergétiques (la part fossile)										
	Géothermie	Habitat		+2% (4PJ)	Par an (suivant la croissance du marché)	16 PJ	en 2050 4 fois l'année de base	8 PJ	Doublé par rapport au REF	8 PJ	Doublé par rapport au REF	8 PJ	Doublé par rapport au REF	8 PJ	Doublé par rapport au REF	
		Résidentiel		min +10%	en 2050	min +15%	en 2050	min +15%	en 2050	min +15%	en 2050	min +15%	en 2050			
	Aérothermie			53000	Unités par an	60950	Unités par an (15% plus que le REF)	53000	Unités par an (10% plus que le REF)	58300	Unités par an (10% plus que le REF)	53000	Unités par an (10% plus que le REF)	58300	Unités par an (10% plus que le REF)	
Solaire	Chauffage Eau chaude sanitaire	Résidentiel	min +10%	Par rapport à l'année de base	min +20%	Par rapport à l'année de base	min +20%	Par rapport à l'année de base	min +20%	Par rapport à l'année de base	min +20%	Par rapport à l'année de base	min +20%	Par rapport à l'année de base		
		Tertiaire	1.26	En PJ - max : 10% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030	2.51	En PJ - max : 20% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030	2.51	En PJ - max : 20% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030	2.51	En PJ - max : 20% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030	2.51	En PJ - max : 20% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030	2.51	En PJ - max : 20% Vision ADEME en 2030 doublé en 2050 par rapport à 2030		
Produits pétroliers	Quantité de ressource disponibles - consommation final		=2017	en 2050	-80%	Par rapport à l'année de base			-80%	Par rapport à l'année de base	-80%	Par rapport à l'année de base	-100%	Par rapport à l'année de base		
Réseaux de chaleur	Quantité d'énergie livrée	Résidentiel	max x 2 min +10%	Par rapport à l'année de base	25 PJ	max 15 PJ min +20%	20 PJ	20 PJ	20 PJ	20 PJ	20 PJ	20 PJ	20 PJ			
		Tertiaire	Max +10% Min + 10%	Max : Croissance annuelle Min : +10% par rapport à 2017		Max 10 PJ Min + 10%								20 PJ		

Tableau 48 : Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour le secteur du transport

		REFERENCE		Economie Circulaire		Décarbonation SR		SRADDET		Hydrogène		Autonomie		
GNV		max 15% de la consommation énergétique du secteur en 2017		max 30% de la consommation énergétique du secteur en 2017		max 30% de la consommation énergétique du secteur en 2017		max 30% de la consommation énergétique du secteur en 2017		max 30% de la consommation énergétique du secteur en 2017		max 30% de la consommation énergétique du secteur en 2017		
	BGNV	min +10% du gaz disponible dans le secteur en 2050		min +20% du gaz disponible dans le secteur en 2050		min +20% du gaz disponible dans le secteur en 2050		min +20% du gaz disponible dans le secteur en 2050						
Véhicules particuliers	Électriques	ZFC-	max 20 % du total de Véhicules particuliers		min 30% du total de Véhicules particuliers		30 - 50% du total de Véhicules particuliers		min 30% du total de Véhicules particuliers		30 - 50% du total de Véhicules particuliers		min 50% du total de Véhicules particuliers	
		ZFC+	max 30 % du total de Véhicules particuliers		min 50% du total de Véhicules particuliers		min 50%		min 50% du total de Véhicules particuliers		max 80% du total de Véhicules particuliers		max 80% du total de Véhicules particuliers	
	Diesel	Part maximale véhicule diesel	-40%	dès 2040							-80%	dès 2040	-80%	dès 2040
	Gaz	min -10% des consommations des véhicules particuliers en 2050		min -15% des consommations des véhicules particuliers		min -15% des consommations des véhicules particuliers		min -15% des consommations des véhicules particuliers						
Report modal	Personnes par véhicule particulier	1.2		1.5 en 2050		1.5 en 2050		1.35 dès 2030		1.5 en 2050		1.5 en 2050		
	Véhicules à mobilité individuel (vélos/trottinettes)	ZFC- (10% trottinettes - 90% vélos)	Part vélo 2% en 2030 et 5% en 2050		6% en 2030, 12% en 2050		9% dès 2030		6% en 2030, 9% en 2050		6% en 2030, 9% en 2050		6% en 2030, 9% en 2050	
		ZFC+ (30% trottinettes - 70% vélos)	Part vélo 3% en 2030 et 6% en 2050 un peu conservateur par rapport aux objectifs régionaux et nationaux		9.5% en 2030, 17% en 2050		12 % dès 2030		9.5% en 2030, 12% en 2050		9.5% en 2030, 12% en 2050		9.5% en 2030, 15% en 2050	
		Hydrogène			Objectif SRADDET : 6% en 2030 10% en 2050		Objectif SRADDET : 6% en 2030 10% en 2050		Objectif SRADDET : 6% en 2030 10% en 2050		max 5% additionnels		Objectif SRADDET : 6% en 2030 10% en 2050	
	Bus	ZFC-	6% en 2050		10% en 2030 et 20% en 2050		10% en 2030 et 20% en 2050		10% en 2030 et 20% en 2050		10% en 2030 et 20% en 2050		10% en 2030 et 20% en 2050	
		ZFC+	Part modal 10% en 2050											
		Gaz	min -20% des consommations des bus		min -30% des consommations des bus		min -15% des consommations des bus		min -30% des consommations des bus					
	Hydrogène	2030 2040 2050								300 600 1200		Suit les objectifs du plan régional		
Poids lourds	Gaz	min -15% de consommations de poids lourds		min -30% de consommations de poids lourds		min -15% de consommations de poids lourds		min -30% de consommations de poids lourds						
	Tons par véhicule			12 t /v		12 t /v								
	Hydrogène	2030 2040 2050						Suit les objectifs de plans régionaux		630 1260 2520		Suit le plan régional hydrogène en 2030, à 2050 on prolonge la tendance		
Autres				Pas de nouveaux véhicules à essence et diesel dès 2040		Pas de nouveaux véhicules à essence et diesel dès 2040		Pas de nouveaux véhicules à essence et diesel dès 2040						
Bicfuel		Max 20 PJ		doublé par rapport à l'année de base		Max 20 PJ		doublé par rapport à l'année de base		Max 20 PJ		doublé par rapport à l'année de base		
Hydrogène		2050		min 15 PJ		min 30 PJ				min 30 PJ		Soit 20 % de la consommation de diesel et d'essence de l'année de base		
Véhicules utilitaires	Hydrogène	2030								4000		8% du plan national hydrogène		
		2040								8000		Doublé par rapport à 2040		
		2050								16000				

Tableau 49: Résumé des hypothèses retenues pour les différents scénarios pour la production électrique

				Référence		Economie Circulaire		Décarbonation SR		Hydrogène		Autonomie	
			Croissance	2017	2050	2050							
Production Électrique (PJ)	Biogaz	Max	6%	0.84	4.9	Max 30 PJ	Peut substituer la part du gaz naturel dans le mix de production d'électricité	Max 30 PJ	Peut substituer la part du gaz naturel dans le mix de production d'électricité	Max 30 PJ	Peut substituer la part du gaz naturel dans le mix de production d'électricité	Max 30 PJ	Peut substituer la part du gaz naturel dans le mix de production d'électricité
		Bas	1%		1.16	2.32	Doublé par rapport au scénario de base	2.32	Doublé par rapport au scénario de base	2.32	Doublé par rapport au scénario de base	2.32	Doublé par rapport au scénario de base
	Biomasse	Max	2%	1.43	2.75	2.75		2.75		2.75		2.75	
		Bas	0%		1.43	1.43		1.43		1.43		1.43	
	Éolien	Max	2%	0.42	0.81	1.62		1.62		0.81		5 PJ	
		Bas	1%		0.59	0.59		0.59		0.59		0.59	
	Hydroélectricité	Max	1%	28.65	35	35		35		35		35	
		Bas	0%		29.13	29.13		29.13		29.13		29.13	
	Déchets Ménagers (VE)	Max	1%	1.53	2.3	2.3		2.3		2.3		2.3	
		Bas	0%		1.53	1.53		1.53		1.53		1.53	
	Solaire photovoltaïque	Sol	UP 10%	1.47	47.52	54.00		54.00		100% Peut mobilisation de potentiels pour la filière photovoltaïque aux toitures et au sol (potentiels à enjeux modérés et sans enjeux)		100% Peut mobilisation de potentiels pour la filière photovoltaïque aux toitures et au sol (potentiels à enjeux modérés et sans enjeux)	
			LO 5%		30.26	30.26		30.26		30.26		30.26	
		Toiture	UP 10%	0.77	80.46	92.80		92.80		92.80		92.80	
			LO 5%		3.85	3.85		3.85		3.85		3.85	
	Energy maritime	GW				3		3		2		2	
Fossiles	Max	0%	35.54	35.54	Pas de nouvelles centrales/ max la moitié de la production de gaz naturel en 2017 mais avec du CCS		Pas de nouvelles centrales/ max la moitié de la production de gaz naturel en 2017 mais avec du CCS		Pas de nouvelles centrales		Pas de nouvelles centrales		

Ainsi, nous avons présenté les différents scénarios de transition que nous avons construits en détaillant les hypothèses retenues pour chaque un d'eux. Dans la section suivant nous allons analyser sous différents angles les résultats obtenus.

5.2. Analyse des résultats de prospective

5.2.1. Quelle évolution du secteur énergétique final pour arriver à un territoire durable

Dans cette section nous allons explorer les résultats obtenus en termes de consommation final d'énergie, et analyser quels énergies se sont consommées et où et pour quelles différents secteurs de consommation.

La Figure 28 présente le mix énergétique par scénario en 2050. Dans tous les scénarios, on peut observer une diminution de la consommation d'énergie finale de la région à l'horizon 2050. Dans le scénario *Référence*, la consommation énergétique n'est ainsi réduite que de 2 % en 2050 par rapport à 2017. Le plus faible niveau de consommation énergétique est atteint dans le scénario *Neutralité*, avec une réduction de 16 % par rapport à 2017, suivi par le scénario *Sraddet* qui affiche une réduction de 14 %. Le scénario *Circularité* quant à lui montre une réduction de la consommation de 13%.

Ainsi, nous pouvons observer l'importance de la rénovation des bâtiments pour aider à maîtriser la demande énergétique de la région. La rubrique rénovation montre la consommation énergétique qui a été évitée grâce à l'isolement de bâtiments. De plus, force est de noter que les diverses politiques envisagées dans les différents scénarios ont permis la réduction de la consommation d'énergies fossiles de façon significative. De toute évidence, c'est dans le scénario *Neutralité* que l'on peut noter la réduction la plus importante en termes de ressources fossiles de 84 % en 2050 par rapport à 2017. Par rapport aux autres scénarios ceci s'explique, principalement par la consommation du biogaz qui représente 15 % (68 PJ) de la demande énergétique de la région. L'unique hypothèse concernant une consommation minimale pour le biogaz a été appliqué pour le secteur du transport, où le biogaz doit représenter au moins 20 % de la consommation du gaz dans le secteur. Pour autant, on notera que le biogaz consommé est issu à 84 % du réseau gazier français, le reste étant couvert par la production locale. C'est le seul scénario qui fait appel au biogaz provenant du réseau français en 2050, dans les autres scénarios, tout le biogaz consommé est produit localement. Le scénario *Autonomie* atteint une réduction de la consommation d'énergies fossiles de 65 % grâce à la substitution du gaz naturel provenant du réseau gazier par d'autres énergies, notamment de l'électricité produit localement (140 PJ) et du gaz de synthèse dont la consommation est la plus importante par rapport à tous les scénarios (34 PJ). Dans ce scénario, le biogaz joue aussi un rôle important dans la transition énergétique de la région couvrant 5 % de la consommation énergétique régionale et représentant par ailleurs la production la plus élevée de biogaz de tous les scénarios avec 24 PJ. Ainsi, le biogaz se montre être un vecteur énergétique très important dans la transition énergétique de la région et un levier significatif pour remplacer la consommation du gaz naturel. Au regard des hypothèses posées dans le scénario « *Autonomie* », la région SUD PACA pourrait devenir autonome des réseaux gazier et électrique à l'horizon 2050.

Le scénario *Circularité* autorise une efficacité énergétique accrue du système énergétique avec l'utilisation de la chaleur fatale provenant de l'industrie où elle est exploitée au maximum à travers les réseaux de chaleur. En dépit de cela, il ne parvient à une réduction de la consommation des énergies fossiles que de 55 %. Ce scénario, avec le scénario *Sraddet*, n'atteint pas une réduction plus importante

de la consommation des énergies fossiles car il n'intègre pas de politiques plus fortes visant la décarbonation du secteur du transport.

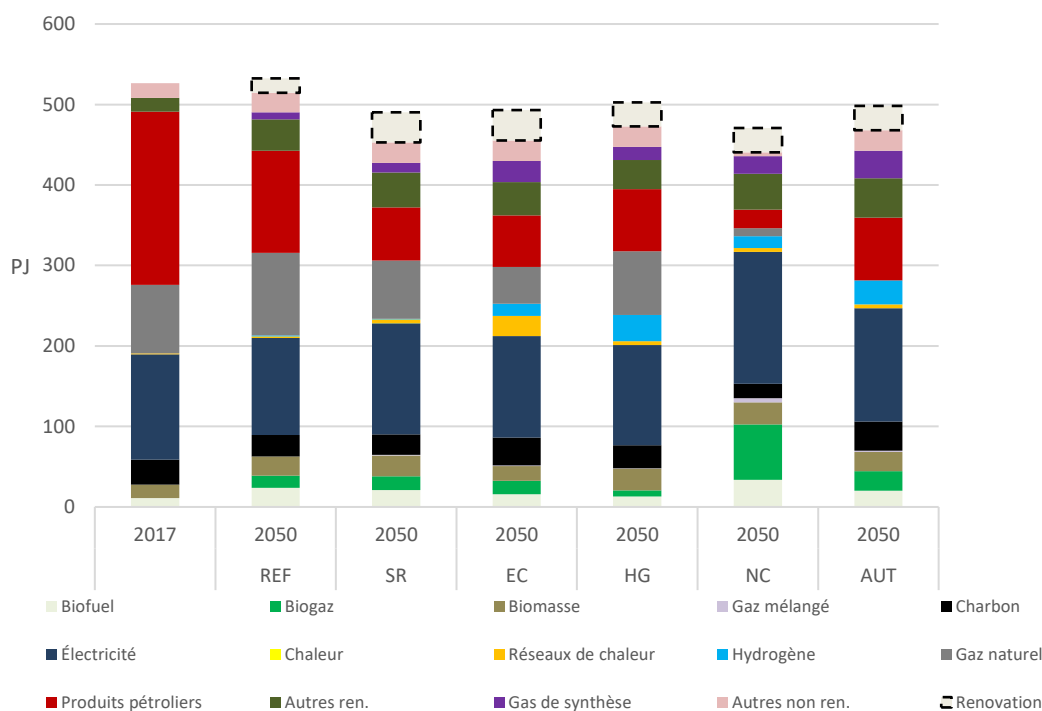


Figure 28 : Consommation finale par type d'énergie et par scénario en 2050

De plus, concernant les autres énergies renouvelables (chaleur ambiante et géothermie), on peut noter leur développement important dans tous les scénarios, elles permettent de couvrir une partie significative de la consommation du secteur de l'habitat (section 5.2.1.1). Un soutien à leur développement s'avère ainsi pertinent, que ce soit pour renforcer la place des pompes à chaleur recourant à la chaleur ambiante ou pour inciter à l'adoption des PAC géothermiques.

L'hydrogène se présente comme une énergie polyvalente, tout d'abord car elle permet un développement déterminant des énergies renouvelables pour la production d'électricité (section 5.2.2). Ensuite, l'hydrogène apparaît comme une des meilleures options pour décarboner le secteur du transport, principalement les poids lourds où l'électricité connaît des limites pour couvrir les besoins (section 5.2.3). De plus, l'hydrogène s'utilise avec du CO₂ pour produire du gaz de synthèse utilisé dans tous les scénarios et qui représente en moyenne 5 % de la consommation énergétique. Cependant le CO₂ pour la production du gaz de synthèse ayant une origine non renouvelable, cela conduit à des émissions de GES à la consommation (ce gaz émettant néanmoins 14 % de moins de CO₂ que le gaz naturel). Il en résulte que son utilisation dans un contexte de décarbonation ne peut survenir que dans les secteurs où l'introduction d'autres énergies renouvelables est complexe, comme dans le secteur industriel où l'aérothermie ou la géothermie ne peuvent pas être utilisés. Dans le scénario *Neutralité* notamment, le gaz de synthèse ne s'utilise que dans le cadre des activités industrielles car sa consommation dans le secteur résidentiel et tertiaire produit des émissions à la consommation et ne contribue pas à l'objectif de la neutralité carbone. Ainsi, ce gaz de synthèse se présente aussi comme un vecteur important dans la transition énergétique de la région et comme un vecteur à considérer pour réduire la consommation du gaz naturel du secteur industriel.

S'agissant du gaz mélangé, il n'a pas eu une utilisation importante dans les scénarios analysés. Son utilisation maximale survient dans le scénario *Neutralité* avec 5 PJ mais représentant à peine 1 % de la demande d'énergie finale du scénario. Il est alors principalement utilisé dans le secteur de l'habitat. La faible utilisation de cette commodité peut s'expliquer par le fait qu'il est en concurrence directe avec le gaz de synthèse et d'autres gaz qui trouvent une utilisation directe dans la demande finale. On peut dire également qu'il faudrait cibler la consommation des différents types de gaz (de synthèse et hydrogène) pour des consommations spécifiques, une diversification d'usages d'énergies alternatives ne suffirait pas pour accroître son développement. Par exemple, l'hydrogène s'utilisant directement dans le secteur du transport, son injection dans le réseau gazier reste secondaire.

Dans ces trajectoires de transition, à l'horizon 2050 il reste cependant une consommation résiduelle d'énergies fossiles dont une partie provient de la consommation du transport terrestre hors région et du transport aérien. Dans la Figure 29, nous pouvons observer la part de ces consommations par rapport à la consommation des produits pétroliers intra-région. Dans le scénario *Neutralité*, la consommation énergétique des véhicules provenant de l'extérieur de la région est ainsi responsable de la plupart de la consommation de produits pétroliers. Par contre, les autres scénarios conservent une consommation importante de produit pétroliers à l'intérieur de la région en raison principalement du manque de politiques plus ciblées pour la décarbonation du secteur du transport. En outre, on observe une augmentation de la consommation de charbon en moyen de 14 % dans les scénarios *Circularité et Autonomie* où le charbon s'utilise dans de procédés de production de Fer brut avec de capture et utilisation de carbone (CUC). On observe aussi une augmentation dans certains scénarios de la consommation du gaz naturel qui est principalement utilisé pour remplacer les produits pétroliers.

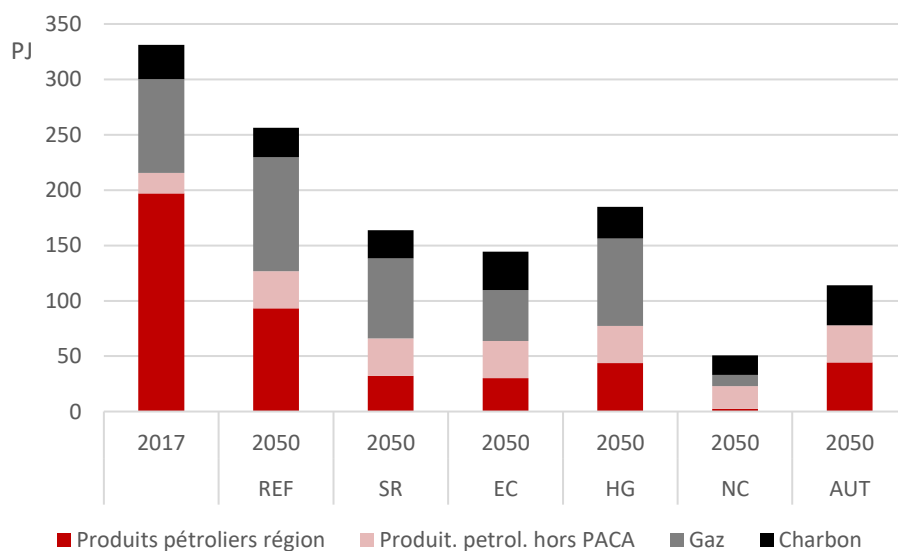


Figure 29 : Consommation finale d'énergies fossiles par scénario en 2050

Finalement, la trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité est présentée dans la Figure 30. La catégorie « Autres » comprend le secteur de l'agriculture et les émissions issues de la distribution du gaz mélangé. Ainsi, en 2050, on observe une légère augmentation des émissions de gaz à effet de serre de cette catégorie, notamment dans le scénario *Neutralité* ces émissions augmentent de 18 % par rapport à 2040 car le gaz mélangé en 2050 est composé à 50 % de gaz de synthèse.

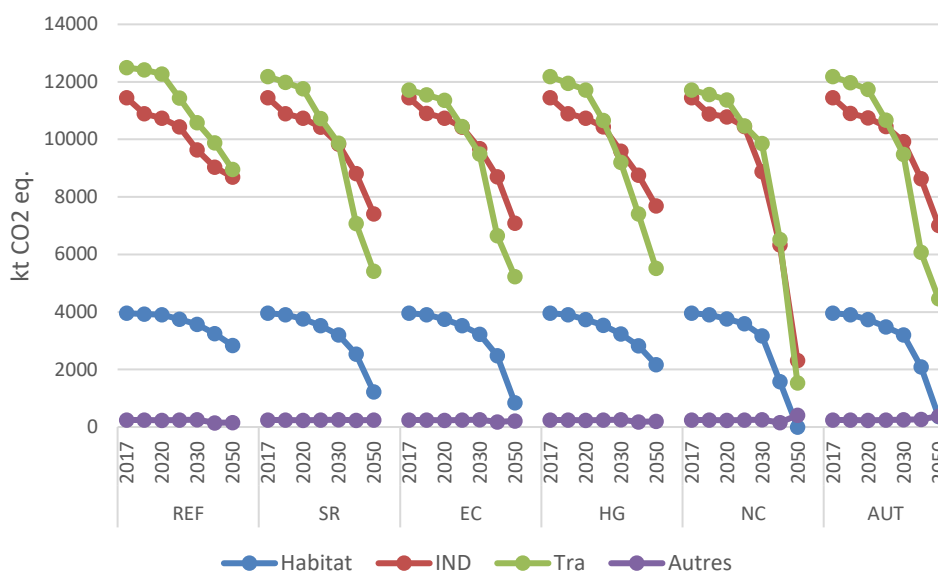


Figure 30 : Emissions de CO₂ par secteur final de consommation et par scénario à l'horizon 2050

En termes d'émissions de gaz à effet de serre par zone d'étude, dans l'Annexe 5, il est possible d'observer que la zone qui demeure carbonée est BDR1 en raison de l'utilisation des énergies fossiles, notamment du gaz naturel pour satisfaire la demande industrielle. Une tendance similaire s'opère dans la zone AM1 où l'activité de l'industrie du ciment compte pour la plupart des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, dans un scénario *Neutralité*, c'est le biogaz qui s'est utilisée principalement comme levier pour aider dans la réduction de la consommation d'énergies fossiles dans ces zones.

5.2.1.1. Les possibles trajectoires de transition du secteur résidentiel-tertiaire

Le secteur résidentiel se présente comme le secteur le plus dynamique en matière de décarbonation, en raison notamment de la mobilisation principalement d'énergies de récupération. La Figure 31 met en évidence l'évolution du mix énergétique du secteur résidentiel-tertiaire à l'horizon 2050 ainsi que les émissions de gaz à effet de serre associées qui diminuent significativement dans tous les scénarios analysés.

Plus précisément, dans le scénario *Autonomie*, la réduction des émissions de dioxyde de carbone est d'environ 90 % en 2050 par rapport à 2017, les émissions résiduelles sont principalement issues de l'utilisation du gaz de synthèse dont la production nécessite du CO₂ qui est ici d'origine fossile. Ainsi, dans un objectif de décarbonation plus ambitieux, la production du gaz de synthèse devra être envisagée avec l'utilisation du CO₂ d'origine renouvelable ce qui pourra être possible si la production de biogaz renouvelable est purifiée avec du captage de CO₂. Dans le scénario *Circularité*, la réduction des émissions de CO₂ atteint environ 80 % en 2050 par rapport à 2017, elle est de 72 % dans le scénario *Sraddet*. Les émissions de CO₂ restantes dans ces deux scénarios proviennent principalement du gaz naturel utilisé pour la production du chauffage. Dans les scénarios *Référence* et *Hydrogène*, la réduction d'émissions n'est que de 28 % et 45 % respectivement en 2050 par rapport à 2017 en raison également du recours important au gaz naturel.

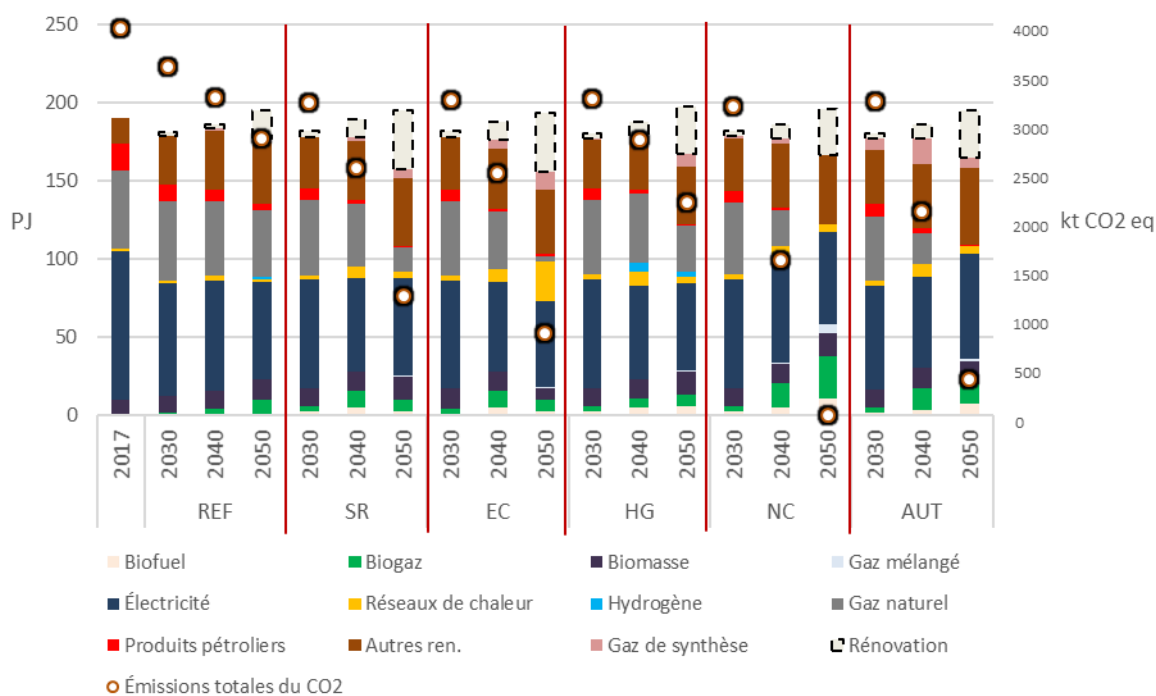


Figure 31: Évolution de la consommation d'énergie finale pour le secteur de l'habitat et les émissions associées

Par contre, dans les différents scénarios, l'importante réduction des émissions de CO2 revient principalement à la rénovation des bâtiments, puis aux différentes technologies de récupération de chaleur, particulièrement les pompes à chaleur qui constituent des technologies polyvalentes car elles permettent de couvrir de besoins de chauffage, eau chaude sanitaire et/ou climatisation en substituant l'utilisation des énergies fossiles.

L'importante réduction de la consommation et des émissions dans les différents scénarios s'explique d'une part, par la rénovation de bâtiments et d'autre part, par les différentes technologies de récupération de chaleur, particulièrement les pompes à chaleur qui constituent des technologies polyvalentes car elles permettent de couvrir de besoins de chauffage, eau chaude sanitaire et/ou climatisation et substituent l'utilisation des énergies fossiles. Ce sont les principaux leviers qui permettront une transition énergétique et d'économie circulaire pour les secteurs résidentiel et tertiaire dans la région.

Dans les scénarios *Neutralité* et *Autonomie*, c'est une utilisation plus importante de ces ressources qui permet la significative diminution tant de la consommation de produits pétroliers que du gaz naturel. D'ailleurs, la géothermie est développée au maximum dans tous les scénarios où elle est disponible, pour les pompes à chaleur et la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire (Figure 32). Les réseaux de chaleur constituent aussi un levier important dans la transition énergétique de la région et contribuent également à réduire la consommation énergétique. Nous pouvons constater cela notamment dans le scénario *Circularité* qui présente une réduction de la consommation de 18 % en 2050 par rapport à 2017. Cependant, le développement des réseaux de chaleur se fait au détriment de l'utilisation de la biomasse, en particulier dans ce scénario *Circularité* où la mobilisation de cette ressource est la plus basse en comparaison avec tous les scénarios analysés, soit un développement de seulement 7 PJ contre une moyenne de 14 PJ pour les autres scénarios.

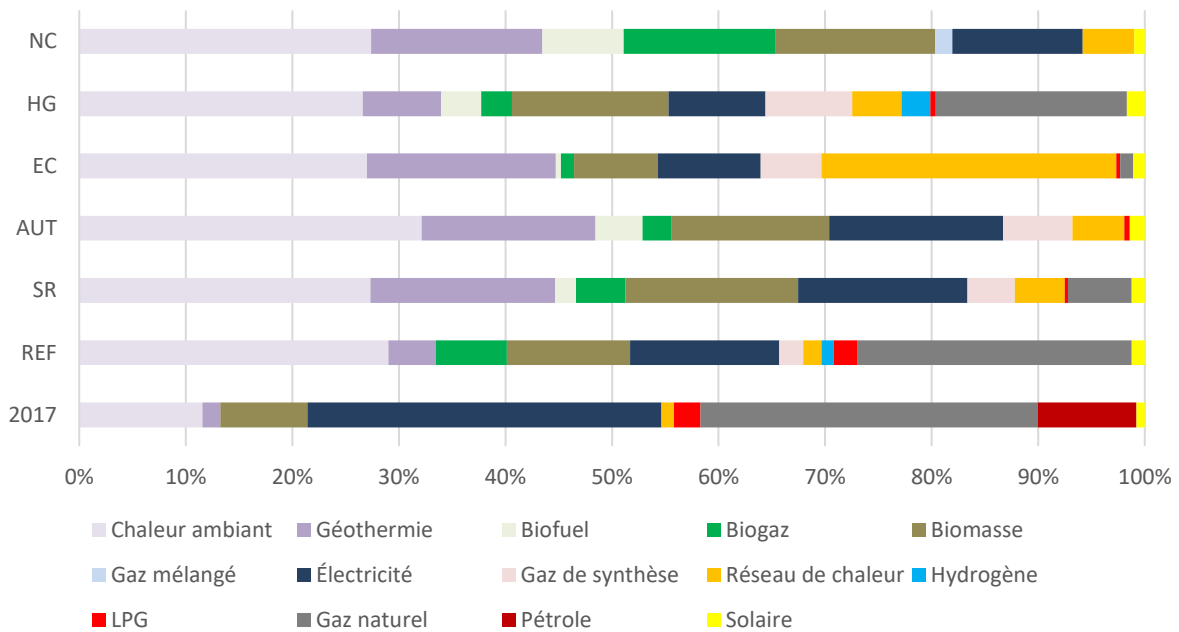


Figure 32 : Part de la consommation énergétique pour la production de chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation

Dans tous les scénarios, la couverture électrique des besoins énergétiques du secteur passe de 50 % (95 PJ) en 2017 à 35 % (57 PJ) en 2050 sauf dans les scénarios *Autonomie* et *Sraddet* où l'électricité compte pour environ 40 % de consommation. Cette électricité est totalement produite localement pour tous les scénarios sauf pour *Hydrogène* et *Neutralité*. Cette réduction de la consommation d'électricité dans les divers scénarios s'explique par l'utilisation d'autres énergies pour couvrir les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire, notamment à travers de pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques. La principale hypothèse pour ces technologies est un seuil maximal pour son développement, spécifié pour chaque scénario. La consommation électrique des secteurs résidentiel et tertiaire est quant à elle couverte en particulier par la production solaire en toiture couplée à des batteries pour couvrir les besoins pendant la nuit et certaines périodes de pic. Comme on le voit dans la Figure 33, la production en toiture peut couvrir de loin la consommation électrique du secteur résidentiel et tertiaire et les batteries sont un moyen de soutien important pour le développement de la filière. Dans tous les scénarios, elles sont utilisées au maximum. La production excédentaire est injectée au réseau pour la consommation d'autres secteurs.

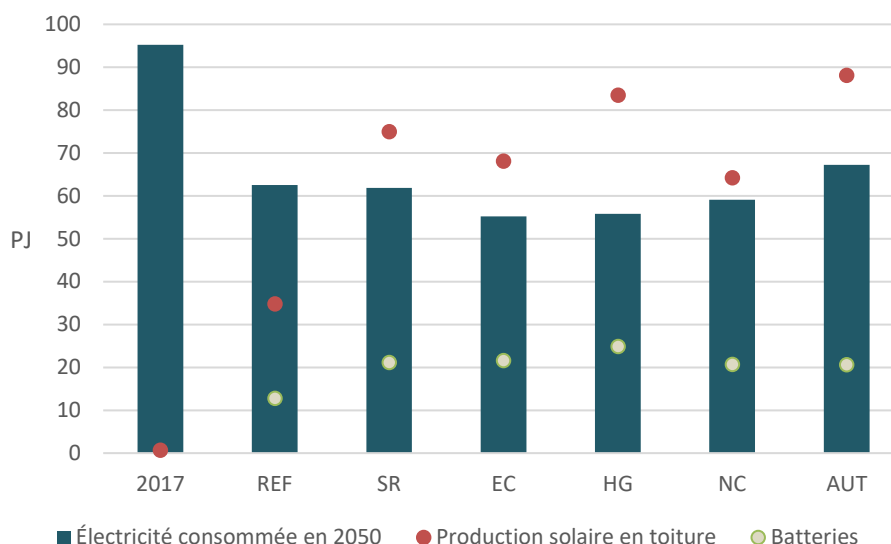


Figure 33 : Consommation électrique du secteur de l'habitat par scénario en 2050 vs production électrique en toiture et stockage par batteries

L'utilisation de l'énergie solaire thermique dans le secteur de l'habitat de la région ne se développe pas très fortement, cela peut s'expliquer par le manque d'une intégration dans le modèle d'une technologie de stockage d'eau chaude sanitaire qui permet couvrir les besoins pendant de périodes de nuit au d'heures pics. Enfin, comme mentionné auparavant, le gaz mélangé ne se développe pas fortement dans la région, la seule utilisation de cette ressource se produit dans le secteur de l'habitat pour couvrir une petite partie des besoins énergétiques de la cuisson et d'autres usages énergétiques.

Au niveau des départements, on observe un développement relativement homogène des différentes énergies dans les territoires de la région (l'Annexe 6 détaille la consommation énergétique par zone d'étude). Pour autant, on peut noter une consommation légèrement plus importante du biogaz dans les zones à forte consommation par rapport à celle à faible consommation, soit respectivement 8 et 6 % de la consommation totale d'énergie en moyenne, et de même pour la géothermie avec respectivement 9 et 6 %. Cette différenciation s'explique par le fait que les zones à forte consommation présentent un potentiel de ces ressources plus important que dans les zones à faible consommation. A l'inverse, la biomasse est plus développée dans les zones à faible consommation, couvrant en moyenne 15 % de la consommation du secteur contre 5 % dans les zones à forte consommation. Concernant les réseaux de chaleur, ils sont principalement déployés dans la zone BDR1 qui présentait par ailleurs les potentiels les plus élevés.

Ainsi, s'agissant des secteurs résidentiel et tertiaire, nous pouvons repérer quatre leviers déterminants pour parvenir à une transition énergétique et d'économie circulaire de la région. Le premier consiste à prioriser la récupération de la chaleur. Dans un premier temps, il conviendrait de favoriser la récupération de chaleur fatale car cela permettrait d'augmenter l'efficacité énergétique du système et la compétitivité de certains secteurs industriels qui puisse valoriser une énergie qui est autrement perdu. Ensuite, il faudrait renforcer le développement des pompes à chaleur, d'abord les pompes à chaleur basée sur la chaleur ambiante qui présente déjà une bonne acceptation dans la région puis favoriser davantage le développement de la géothermie. En particulier, le développement des pompes à chaleur dans la région est plus favorable en raison de son climat plus tempéré. Le second levier réside dans la rénovation des bâtiments en raison des réductions de consommation d'énergie qu'elle permet

et le troisième dans le développement du biogaz afin de remplacer le gaz naturel dans le secteur. Enfin, le quatrième levier consiste à soutenir le développement des centrales photovoltaïques en toiture et à développer un marché de batteries, ce qui permettrait de couvrir les besoins de consommation électrique du secteur ainsi qu'une partie de la demande électrique des autres secteurs.

5.2.1.2. Quels effets sur le secteur du transport

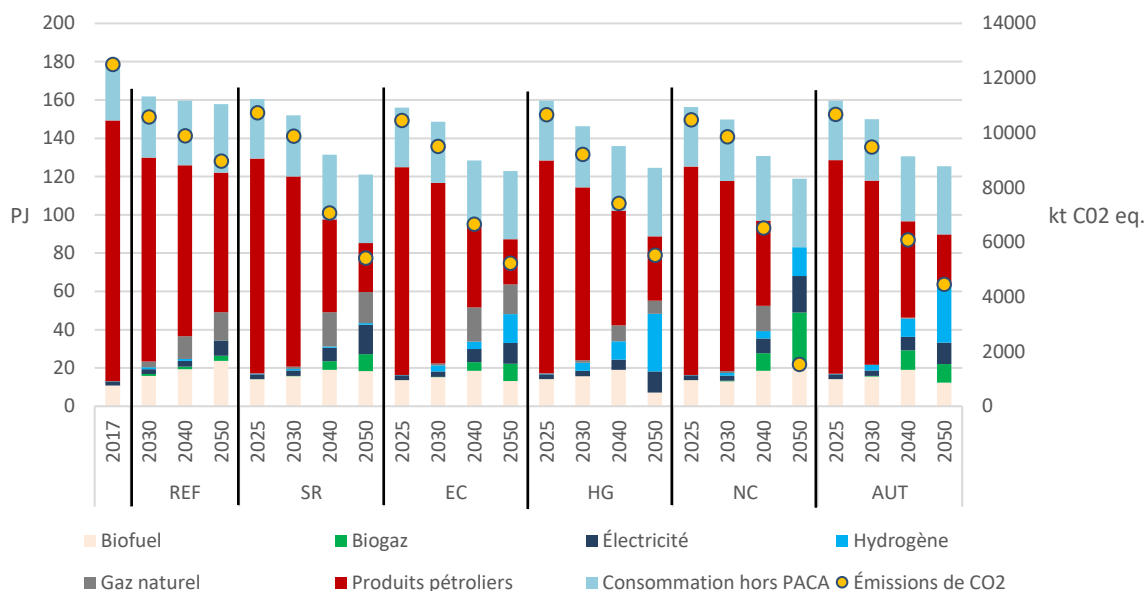


Figure 34 : Consommation énergétique du secteur du transport à l'horizon 2050 par scénario et par type d'énergie consommée

La Figure 34 illustre l'évolution de la consommation du secteur du transport régional à l'horizon 2050 par scénario et par type d'énergie consommée. Ainsi, on observe que la demande d'énergie finale du secteur et les émissions de CO2 sont significativement réduites dans tous les scénarios. Ces réductions résultent des stratégies intégrées à cette fin, comme la mise en place de covoiturage, l'utilisation accrue du transport public et des véhicules à mobilité individuelle, l'intégration des énergies decarbonées qui permettent la substitution des produits pétroliers ou encore l'utilisation de véhicules plus performants. D'ailleurs, dans le scénario de Référence où peu de ce type d'actions a été intégré pour réduire la demande de mobilité, la consommation d'énergie finale du secteur du transport n'est réduite que de 12 % en 2050 par rapport à 2017 et les émissions de 35 %. Pour les scénarios, Sraddet, Circularité et Autonomie, il y a une réduction en moyenne des émissions de gaz à effet de serre de 63 % en 2050 par rapport à 2017 et une réduction de la consommation d'énergie finale de 29 %. La réduction la plus importante de la consommation d'énergie finale dans ce secteur survenant dans le scénario Neutralité avec 38 % et une réduction des émissions de 88 % dans le secteur. Les émissions restantes dans ce scénario proviennent alors des consommations des véhicules hors de la région et du secteur aérien.

Cette réduction de la consommation et des émissions dans ce scénario résulte en grande partie de l'utilisation accrue de véhicules utilitaires électriques le reste est couvert par l'utilisation de biofuel et d'hydrogène. Dans le scénario Neutralité, la réduction des émissions de CO2 des véhicules utilitaires résulte de la substitution des produits pétroliers par l'électricité, dans le cas des véhicules particuliers, par le biogaz et l'électricité et pour les poids lourds par l'hydrogène et le biogaz. Un mix de toutes les énergies disponibles est donc nécessaire pour décarboner le secteur. Dans les autres scénarios,

l'hydrogène est utilisé plus largement à la différence du biogaz. Cependant, dans le cas du scénario Hydrogène où le gaz naturel est utilisé pour couvrir une partie des besoins des poids lourds, celui-ci pourra être substitué par du biogaz ou davantage d'hydrogène dans un objectif de décarbonation plus ambitieux. D'ailleurs, on peut observer que dans le scénario Autonomie où la consommation du gaz naturel provenant du reste de la France est limitée, c'est le biogaz qui est utilisé pour couvrir une partie de la consommation des véhicules particuliers et l'hydrogène ne sert qu'à couvrir les besoins des poids lourds. En outre, on peut observer que les diminutions de la consommation énergétique (-30 %) et les émissions (-55 %) du secteur du transport dans le scénario Sradet résultent d'un mix énergétique composé de gaz naturel, biogaz et d'électricité.

Dans un premier temps on peut constater que le plan régional hydrogène n'a pas eu un effet important dans l'introduction de l'hydrogène dans la région avec une très faible introduction de l'hydrogène dans le mix du secteur. De plus, le biogaz est utilisé pour les bus et le gaz naturel pour les véhicules particulier, tandis que les poids lourds utilisent principalement des produits pétroliers, laissant une très grande marge de décarbonation.

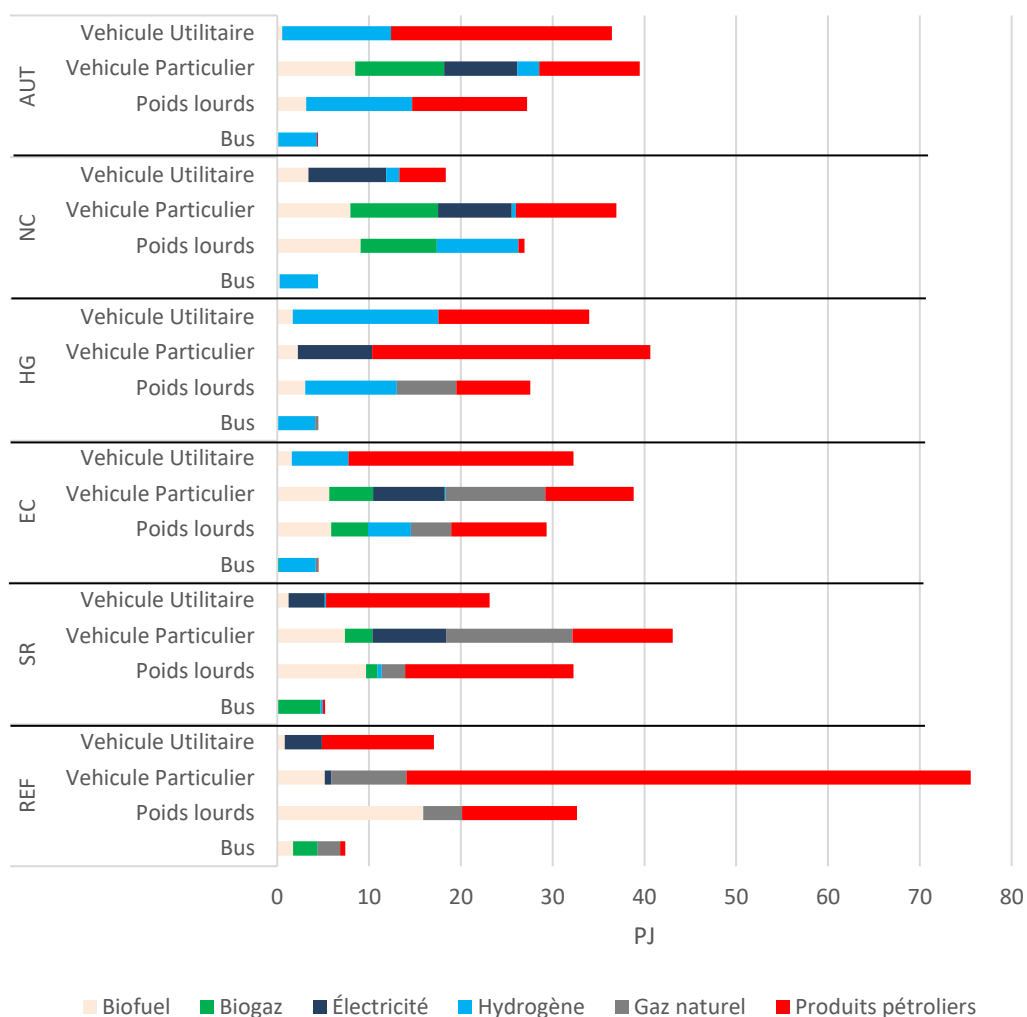


Figure 35 : Consommation énergétique par type de véhicule et par scénario en 2050

En outre, l'impact de la promotion du covoiturage dans la région en comparant la consommation des véhicules particuliers dans le scénario de Référence qui n'intègre pas des actions de covoiturage contre

les autres scénarios qui présentent une augmentation de remplissage de véhicules de 1.5 à 1,7 personne par véhicule, donnant une différence de la consommation énergétique d'autour de 50 %. Le passage d'un remplissage de 1.5 à 1.7 personnes par véhicule en 2050 permet une réduction additionnelle de 5 % d'énergie finale consommée. On peut constater cela en comparant par exemple les scénarios *Hydrogène* et *Circularité*.

Ainsi, selon les différents scénarios, la décarbonation du secteur du transport routier de la région nécessite la mobilisation de diverses ressources disponibles et notamment de l'hydrogène dont la pénétration est importante dans tous les scénarios, et en particulier pour ce secteur. C'est le cas notamment pour les poids lourds pour lesquels il est fixé d'utiliser de l'hydrogène au regard de la difficulté de pénétration d'autres énergies notamment de l'électricité. L'hydrogène peut s'utiliser aussi dans les bus, comme c'est le cas en particulier dans les scénarios *Neutralité*, *Hydrogène* et *Autonomie*. En ce qui concerne l'électricité, Dans tous les scénarios sauf Référence, l'électricité compte pour 20 % de l'énergie consommée par les véhicules particuliers en 2050, ce qui reste relativement faible par rapport à son potentiel maximal d'électrification.

Les véhicules à mobilité individuelle contribuent aussi à la réduction des émissions de dioxyde de carbone et de la demande énergétique. Cependant leur utilisation ne couvre en moyenne que 5 % de la mobilité demandée par les véhicules particuliers en 2050 même quand les hypothèses de déploiement dans les différents scénarios lui permettent de couvrir maximum jusqu'à 15 % des besoins de mobilité. L'utilisation limitée de ce genre de véhicules réside dans le fait qu'ils ne peuvent parcourir principalement que de la courte distance (Figure 36). On notera tout de même que leur utilisation atteint un niveau plus élevé dans le scénario *Neutralité*, où ils couvrent 7 % de la demande de mobilité des passagers particuliers.

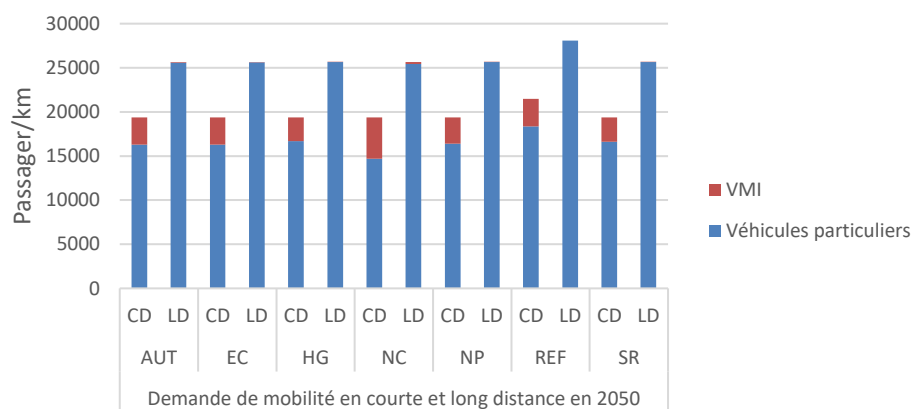


Figure 36 : Couverture de la demande de mobilité de courte et long distance de passagers par les véhicules particuliers et les véhicules à mobilité individuelle

En termes de développement par zone, dont l'Annexe 7 fournit le détail de la consommation énergétique, nous pouvons noter que le biogaz pour le secteur du transport se développe surtout dans les zones AHP, BDR1, VAR1 et VAUC. Concernant l'hydrogène, il est beaucoup plus développé dans les zones de haute consommation, notamment VAR1 et BDR1. Quant aux véhicules à mobilité individuelle, dans tous les scénarios, ils se déploient davantage dans les zones à haute consommation par rapport à celles à faible consommation. Principalement dans la zone BDR1 dans le scénario *Neutralité*, ce type de véhicule arrive à couvrir 15 % de la demande de mobilité, alors que dans le reste des zones à haute

consommation, ils couvrent en moyenne 10 % de la demande de mobilité versus 5 % en moyenne dans les zones à faible consommation.

Ainsi, ces résultats mettent en avant différents les points clés qui pourront favoriser la décarbonation du secteur du transport de la région PACA. Dans un premier temps, il apparaît important de soutenir plus fortement les solutions de réduction de la consommation énergétique que sont le covoiturage et l'utilisation du transport public ainsi que l'utilisation des véhicules à mobilité individuelle tels que les vélos à assistance électrique et les trottinettes. S'agissant du covoiturage, une cible d'au minimum 1,5 personne par véhicules est recommandée. Pour les véhicules à mobilité individuelle, il conviendrait de cibler un fort développement dans les zones à haute consommation pour couvrir au minimum 10 % de la consommation de véhicules particuliers et dans les zones à faible consommation, un objectif minimum de 5 %. Quant à la consommation énergétique, l'utilisation plus importante de l'électricité pour les véhicules particuliers et une partie de véhicules utilitaires s'impose également. Cela donnera en outre une motivation supplémentaire pour la création d'un marché de batteries de seconde vie et donc une intégration plus dynamique des panneaux photovoltaïques en toiture (voir section 5.2.2.1). De plus, l'hydrogène devrait être ciblé pour les poids lourds et les bus, tandis que le biogaz pourrait être utilisé pour compléter la décarbonation du secteur. En ce sens, un objectif de produire au moins 30 PJ d'hydrogène en 2050 devrait être établi, ce qui correspond à la consommation des poids lourds en 2050 dans nos différents scénarios.

5.2.1.3. La transformation du secteur de l'industrie

Dans le secteur de l'industrie, on observe que la consommation augmente dans tous les scénarios en raison d'une activité industrielle plus importante (Figure 37).

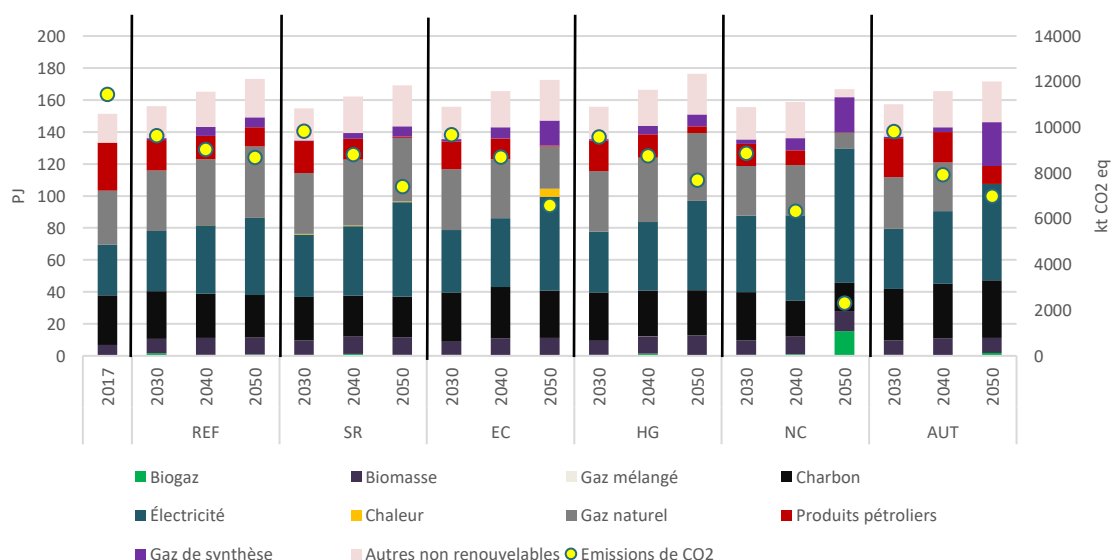


Figure 37 : Évolution de la consommation énergétique du secteur de l'industrie par énergie et par scénario jusqu'en 2050

La moindre consommation énergétique survient dans le scénario *Neutralité* avec une consommation de 169 PJ contre en moyenne 173 PJ dans les autres scénarios, en raison de l'augmentation de l'électrification du secteur spécifiée dans le scénario avec des procédés industrielles plus efficaces. Pour parvenir à réduire 80 % des émissions en 2050 par rapport à 2017 dans ce scénario, on observe que le biogaz et le gaz de synthèse ont été utilisés pour remplacer les produits pétroliers, une partie

de la consommation du gaz naturel et des autres énergies non renouvelables. L'utilisation du biogaz a principalement eu lieu dans l'industrie de la chimie et de la sidérurgie tandis que le gaz de synthèse a été principalement utilisé dans l'industrie du papier, du ciment et d'autres métaux.

Dans le scénario *Autonomie*, on peut noter une augmentation de la consommation des produits pétroliers par rapport aux autres scénarios qui montrent quant à eux une quasi fin de l'utilisation de telles ressources. Ici, les produits pétroliers s'utilisent principalement dans l'industrie du ciment. Également, le gaz de synthèse a singulièrement contribué à réduire la consommation du gaz naturel, il atteint d'ailleurs dans ce scénario la consommation la plus importante par rapport à tous les autres scénarios. Ici, le gaz de synthèse est principalement utilisé dans les autres industries, le secteur de la chimie-pharmaceutique et dans la production finale d'acier. Leur consommation a lieu notamment dans les zones de production autrement dit dans les zones AM1 et BDR1. On peut constater aussi que dans le scénario *Hydrogène* où il n'y a pas un grand recours au recyclage de ferraille (ferraille disponible pour couvrir maximum 50 % de la production d'acier brut) dans l'industrie de la sidérurgie, la consommation énergétique s'accroît de 16 %. En moyenne, l'électricité couvre 35 % de la consommation industrielle dans tous les scénarios (sauf *Référence* et *Neutralité*), il reste cependant une marge d'augmentation de leur utilisation, principalement pour remplacer les autres énergies non renouvelables utilisées dans le secteur de la chimie. Dans le scénario *Neutralité*, l'électrification du secteur atteint 50 % de la consommation du secteur, la contrainte de 70 % d'électrification du secteur en 2050 n'est donc pas satisfaite en raison des secteurs de la sidérurgie et du ciment dont l'électrification demeure complexe.

Dans le secteur de l'industrie, des procédés de CUC sont également mobilisables et le sont principalement dans les scénarios *Autonomie*, *Circularité* et *Neutralité* pour le secteur du ciment, au regard des projets engagés par VICAT dans les Alpes Maritimes, et dans le secteur de la sidérurgie dans la zone BDR1. Plus précisément, la technologie choisie pour décarboner le secteur du ciment est l'oxycombustion partielle⁴². Dans le cas de l'usine de production d'acier, le procédé choisi dans les scénarios *Circularité* et *Autonomie* c'est un haut fourneau à oxygène avec du capture de CO₂ et pour le scénario *Neutralité* il s'utilise du CUC dans un procédé COREX⁴³ qui consomme moins de carbone mais demande plus de frittage et d'oxygène. Ainsi à travers ces deux procédés le CO₂ est capté et mélangé avec l'hydrogène à travers un procédé de méthanation pour produire le gaz de synthèse utilisé principalement dans le secteur industriel.

Ainsi, pour parvenir à une transition énergétique du secteur industriel de la région, les efforts d'électrification du secteur doivent se poursuivre, ce qui est possible comme démontré dans le scénario *Neutralité* qui conduit à penser à une cible d'électrification d'au moins 50 % du secteur industriel. En outre, il conviendrait de promouvoir l'utilisation du gaz décarboné, le biogaz et le biométhane, ce qui est possible à travers l'utilisation du CUC dans l'industrie du ciment et de l'acier.

⁴² Ce technologie concentre l'opération d'oxyfuel uniquement sur le calcinateur qui est séparé des unités de four de l'usine

⁴³ Il s'agit d'un processus de réduction par fusion

5.2.2. Quelle évolution du secteur électrique dans une optique de territoire durable ?

5.2.2.1. Une production électrique durable pour la région

Cette section vise à analyser les résultats obtenus pour le secteur de la production finale d'électricité et analyser quelles énergies se sont développées, dans quelle zone ainsi que les échanges électriques entre zones et avec le reste de la France.

La Figure 38 montre la production d'électricité par scénario aux horizons 2030 et 2050. Tout d'abord, on peut noter que la production d'électricité atteint le niveau le plus élevé dans le scénario *Autonomie* avec 204 PJ, suivi par le scénario *Hydrogène* avec 189 PJ. Dans le premier scénario, cet important développement s'explique principalement par le fait que l'électricité sert à couvrir une partie de l'électricité et du gaz naturel provenant du réseau français auquel il n'est plus possible de recourir. On notera également que ce qui pousse le développement de la production électrique régionale dans ce scénario mais aussi dans le scénario *Hydrogène* est la demande d'électricité émanant des électrolyseurs. En effet, dans ces deux scénarios, le potentiel solaire au sol (sous enjeux modérés et enjeux fort) a été utilisé au maximum (54 PJ). Une tendance similaire s'observe dans les scénarios *Circularité* et *Neutralité carbone* où les potentiels solaires au sol ont été développés à hauteur d'environ 87 %. Cela contraste avec les autres scénarios où la production solaire au sol est faiblement développée comme dans le scénario *Sraddet* ou *Référence* dont la production atteint environ 30 PJ. Ce faible recours à l'utilisation du photovoltaïque au sol dans le scénario *Sraddet* s'explique par le fait que la production solaire en toiture est trop haute (86 PJ – 55 % des objectifs établis par la région) et la production d'hydrogène proposée dans le plan hydrogène n'est pas suffisamment élevée pour inciter le développement du solaire au sol. Ainsi, le scénario *Sraddet* atteint un développement d'environ 57 % des objectifs établis par la région pour la production d'électricité.

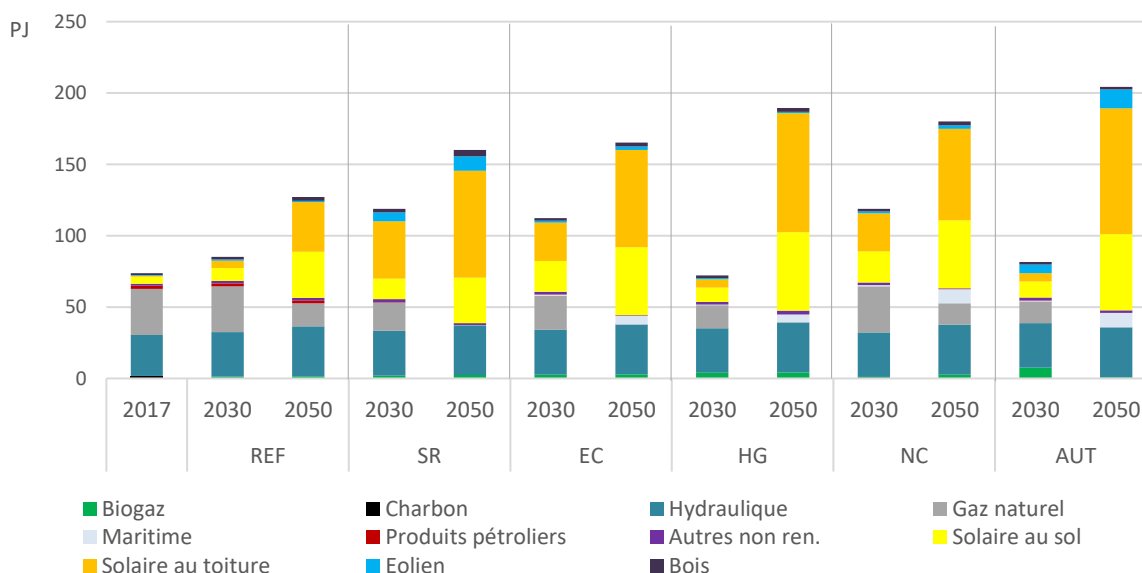


Figure 38 : Production électrique régionale en 2030 et 2050 pour chaque scénario et par type d'énergie utilisée

La production solaire en toiture suit aussi un important développement dans tous les scénarios et, comme mentionné dans la section 5.2.1.1, cette production sert principalement à couvrir les besoins

des secteurs résidentiel-tertiaire, le reste étant injecté dans le réseau électrique pour être consommé par les autres secteurs.

Les ressources hydroélectriques sont utilisées au maximum dans tous les scénarios, confirmant l'importance de ces ressources pour l'approvisionnement en électricité de la région. Cependant, son développement doit être prudent, car le changement climatique pourrait avoir un impact important sur la disponibilité des ressources hydriques. A titre d'illustration, avec 1 % de capacité installée en plus en 2017 par rapport à 2007, la région a produit 1 % de moins d'électricité en utilisant cette ressource.

Les autres technologies qui peuvent contribuer à la transition énergétique de la région sont l'éolienne terrestre et les technologies utilisant l'énergie des mers. Dans tous les scénarios, l'éolien terrestre a été développé à son maximum possible au regard de la contrainte supérieure attribuée à son développement, ce qui montre que cette technologie devrait recevoir plus d'attention de la part des décideurs politiques qui doivent chercher à surmonter les obstacles actuels qui affectent son déploiement dans la région. L'énergie maritime, utilisant principalement la force marémotrice, est quant à elle développée dès 2030 dans tous les scénarios où elle est disponible. Son développement à l'horizon 2050 est plus important dans le scénario *Autonomie* où elle atteint une production de 10 PJ, soit 40 % du potentiel établi pour cette ressource dans ce scénario. Cela montre qu'il faudra considérer ce genre de technologie qui pourra contribuer à la transition énergétique de la région. En outre, les technologies éoliennes en mer ne sont développées que dans le scénario *Autonomie* (3 PJ) et dans le scénario *SRADDET*. Dans ce dernier son développement suit les limites inférieures établies comme contrainte, ce genre de technologies reste cher par rapport aux autres options de production d'électricité dans la région.

Concernant la filière biogaz pour la production d'électricité, l'utilisation de cette ressource est plus importante dans le scénario *Hydrogène*, où le biogaz est utilisé à hauteur d'environ 4 PJ. Ce développement s'explique par le fait qu'il n'y a pas de politiques qui encouragent l'usage du biogaz dans les secteurs finaux de consommation, le rendant disponible pour le secteur électrique. Le biogaz s'utilise aussi comme énergie de transition pour couvrir la sortie des premières centrales à gaz naturel en 2030, cela s'observe notamment dans le scénario *Autonomie*. La production des centrales à biogaz dans tous les scénarios s'opère principalement dans la nuit et dans les heures de pic. D'autres technologies utilisées pour couvrir les consommations d'électricité pendant la nuit et les heures de pic sont l'énergie maritime, l'incinération de déchets ménagers et la combustion du bois énergie. En particulier, l'énergie maritime peut être un levier important pour contribuer à limiter les variations de la production solaire ou éolienne car leur production est plus constante notamment celle utilisant l'énergie thermique de la mer.

En outre, nous pouvons constater que le gaz naturel est utilisé surtout dans le scénario de *Référence* dont la production représente en 2050 environ 58 % de celle de 2017 et dans le scénario *Neutralité* où une centrale électrique à gaz naturel avec capture du CO₂ est en opération. Dans les deux scénarios, ces centrales atteignent une production similaire d'environ 15 PJ, qui est utilisée principalement pour couvrir les besoins électriques de nuit et des heures de pic. Cependant, l'utilisation du gaz naturel n'est pas recommandée pour la production d'électricité même avec du CUC, dans la mesure où l'objectif suivi par tous les scénarios est de privilégier le développement des énergies renouvelables du territoire. En outre, cette stratégie répond aux enjeux nationaux de sortir des énergies fossiles et de

réduire les risques géopolitiques en matière d’approvisionnement énergétique et donc cela permet de placer la région comme contributrice à ce niveau.

En outre, si on observe la production électrique à chaque période, nous pouvons constater deux tendances de développement du secteur électrique. La première présente un développement du secteur électrique linéaire comme dans les scénarios *Neutralité et Circularité*, et la seconde montre un développement plus fort vers la fin de la période (voir Figure 39). Cela permet de comparer le potentiel de développement de chaque filière pour chaque période et de regarder comment le reste du système énergétique évolue suivant ces deux stratégies. En particulier cela permet de constater si le rythme annuel de développement du secteur électrique sera suffisant pour répondre aux besoins à la fois d’électrification des utilisations finales et de développement d’une chaîne d’approvisionnement en hydrogène.

Ainsi, on peut observer que dès 2030 il y a une importante opportunité de pousser le développement des ressources énergétiques locales, d’un côté pour couvrir la demande croissante d’électricité et de l’autre côté pour couvrir la sortie des centrales utilisant du gaz naturel. Ce dernier explique la petite réduction de la production en 2030 pour les scénarios *Sraddet et Hydrogène*.

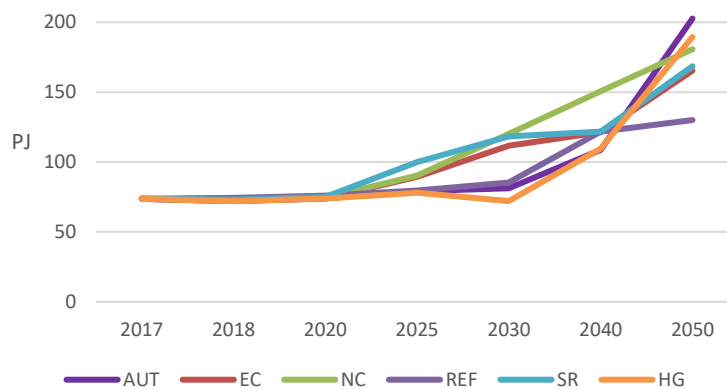


Figure 39 : Production totale d’électricité pour la région par scénario

Concernant l’électricité soutirée du réseau électrique français, nous pouvons observer dans la Figure 40, qu’il y a toujours un recours à l’utilisation de cette ressource dans les scénarios *Hydrogène et Neutralité* en 2050, où il y a une importante augmentation des besoins d’électricité tant pour la consommation finale que pour la production d’hydrogène. Le scénario *Neutralité* montre un comportement particulier, car en 2040 le recours à l’électricité « française » est presque nul, mais pour la période 2050, la consommation électrique augmente significativement. Cela peut s’expliquer par la stratégie d’électrification du secteur industriel à cette période et la production d’hydrogène, qui implique de recourir de nouveau à cette ressource, le développement d’autres ressources régionales restant trop coûteux par rapport à l’électricité provenant du réseau français. C’est le cas par exemple de l’éolien en mer. En outre, on observe, à certaines occasions, une remontée de l’utilisation de l’électricité provenant du réseau français car la production locale n’est pas suffisamment développée pour couvrir tous les besoins électriques régionaux.

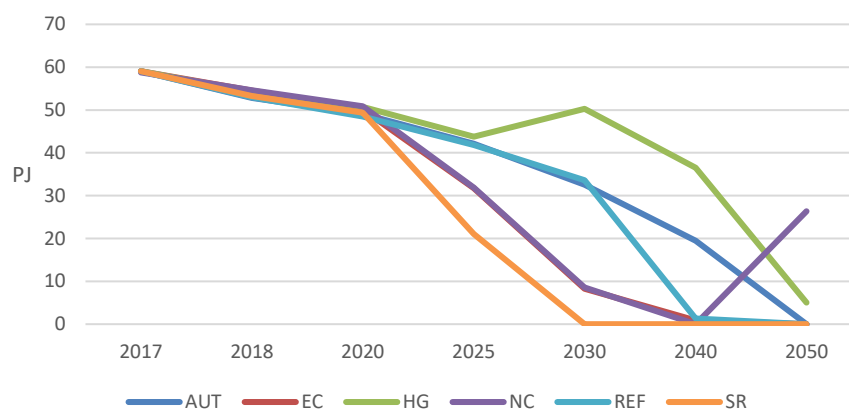


Figure 40 : Electricité soutirée du réseau français par scénario

5.2.2.2. Quid de la production électrique par département ?

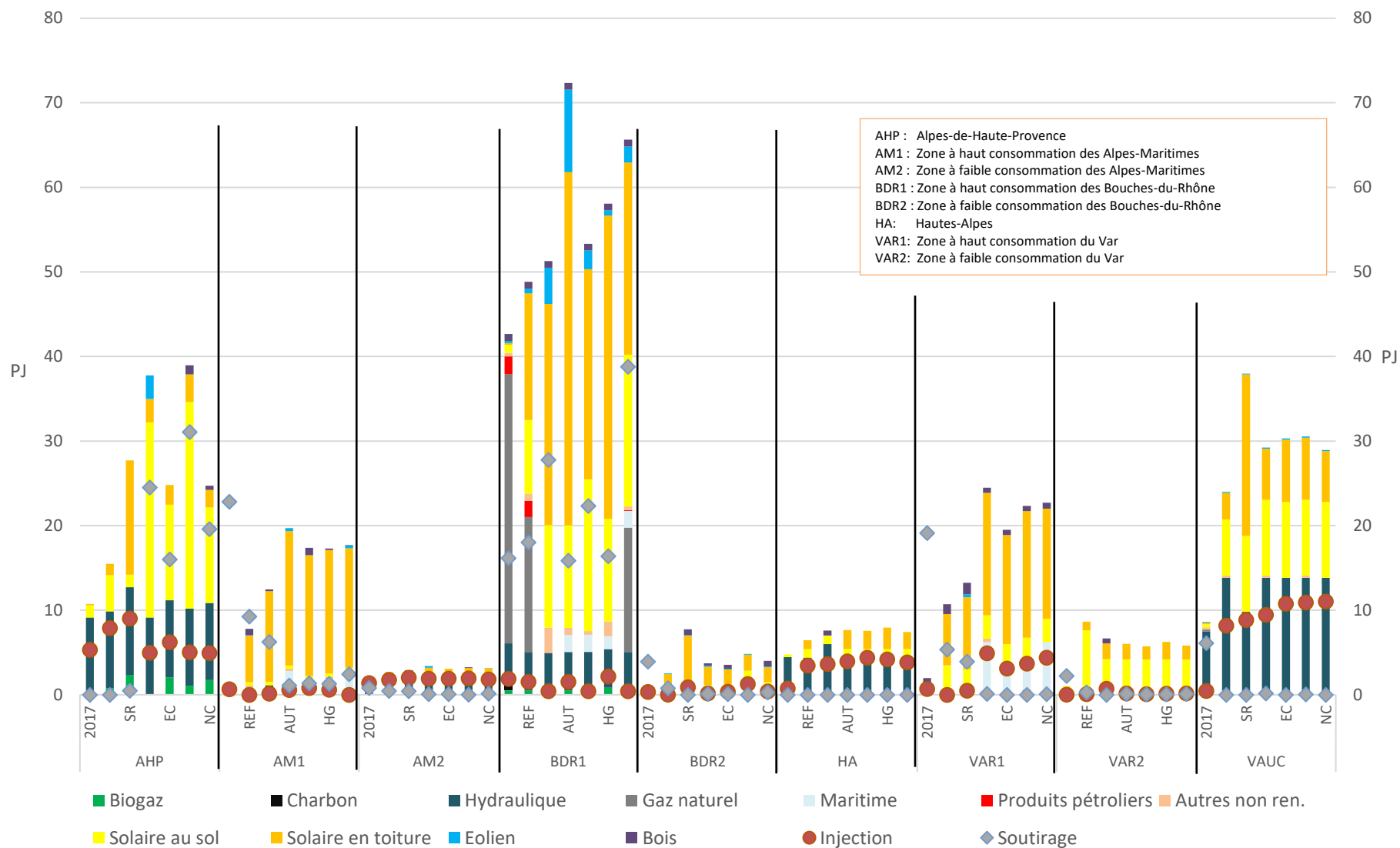
Dans la Figure 41 est présentée la production électrique par zone d'étude. Nous pouvons observer que la production augmente significativement dans tous les scénarios, même si elle reste concentrée dans la zone BDR1. Sa part dans la production énergétique régionale passe de 50 % en 2017 à 33 % en moyenne en 2050 dans les différents scénarios. La filière photovoltaïque en toiture se développe principalement dans les zones à haute consommation qui comptent en moyenne pour 78 % du développement de cette filière. En outre, la production solaire au sol survient en moyenne à 34 % dans la zone AHP. Ce qui explique cette importante production dans cette zone est le niveau de production élevé d'hydrogène développé dans ce territoire. Cependant, pour parvenir dans cette zone à une telle production, il sera nécessaire de recourir aux potentiels solaires au sol à enjeux forts. La production éolienne a lieu quant à elle majoritairement dans tous les scénarios dans la zone BDR1, tandis que la production provenant des technologies maritimes se développe à plus de 60 % dans la zone VAR1. La production additionnelle hydraulique est localisée dans la zone VAUC et le biogaz se développe presque en totalité dans la zone AHP. Ainsi, la zone AHP se positionne comme un territoire clé dans la transition énergétique de la région SUD PACA en raison des flexibilités que le territoire offre à travers le stockage souterrain d'hydrogène et ses potentiels énergétiques.

En termes d'échanges entre régions, la Figure 41 affiche également les soutirages et injections d'électricité de chaque zone d'étude en 2017 et 2050. Ainsi, on constate dans un premier temps qu'il existe une synergie entre les différentes zones pour couvrir leurs besoins électriques. De cette façon, on peut observer que quand il existe une production importante d'hydrogène, comme dans les scénarios *Autonomie ou Hydrogène*, les zones à faible consommation, VAUC, AM2 et HA ainsi que la zone de haute consommation du VAR1 se positionnent comme exportateurs nets. La zone HA ne sollicite pas d'électricité au reste de la région ni au réseau électrique français. La zone AM1 quant à elle, qui était importatrice en 2017, parvient à couvrir la plupart du temps ses besoins électriques par sa production locale. Concernant la zone à haute consommation BDR1, elle continue d'être importatrice nette. Elle soutire principalement de l'électricité pendant la nuit et les heures de pic. Enfin, la zone AHP, passe d'exportatrice nette dans le scénario de référence mais aussi dans le scénario SRADDET à importatrice en soutirant de l'électricité dans les autres scénarios, principalement dans ceux où il y a une production importante d'hydrogène, les besoins d'électricité augmentant

significativement avec la production d'hydrogène. Également, on notera que le soutirage d'électricité dans cette zone s'effectue principalement dans la journée.

Pour accompagner l'importante production solaire atteinte dans les différents scénarios, on note un déploiement du stockage électrique à travers des stations de pompage. Le développement le plus important du stockage intervient dans les scénarios *Autonomie* et *Sraddet*, avec un stockage dans les zones AHP (Castillon), AM1 (Tende) et VAR1 (Tanneron), qui dans chaque scénario, ensemble, stockent 1.1 PJ, soit 1 % de la production électrique en 2050. Dans le reste des scénarios seul le stockage du Castillon dans les AHP se développe.

Figure 41 : Production électrique vs soutirage et injection d'électricité par zone d'étude et par scénario en 2050



5.2.3. Quel rôle joué par les technologies de power-to-gas ?

Cette section a comme objectif d'analyser la production de différents gaz (hydrogène, gaz de synthèse, biogaz) en identifiant quelles ressources ont été utilisées et comment leur production a permis la mobilisation d'énergies renouvelables.

Dans tous les scénarios, la production d'hydrogène est issue majoritairement de l'utilisation d'électrolyseurs mais on peut aussi noter le développement du reformage de la biomasse et de la gazéification des CSR (Figure 42). Dans le scénario *Hydrogène*, la production provient principalement des électrolyseurs car nous avons ciblé ici une production minimale d'hydrogène issue de ces derniers, à hauteur de 50 PJ. Nous avons établi cette contrainte avec l'objectif d'observer l'effet qu'une telle production d'hydrogène aurait sur la production d'électricité provenant de l'utilisation de ressources solaires. Ainsi, cette production a été suffisante pour couvrir tous les besoins d'hydrogène dans le scénario et n'a donc pas laissé la place à l'utilisation du reformage ou de la gazéification, même quand ils étaient disponibles pour développement. Dans les autres scénarios, le reformage de la biomasse est exploité au maximum possible (sauf dans le scénario *Autonomie* où il est utilisé à 86 % de la contrainte maximal établis). Cela montre l'importance que la biomasse peut avoir pour produire de l'hydrogène. Par ailleurs, dans une perspective d'économie circulaire et dans le scénario *Neutralité*, en 2050 le potentiel de CSR a été utilisé au maximum pour la production d'hydrogène à travers la gazéification et ils comptent dans ces cas-là pour environ 30 % de l'hydrogène consommé.

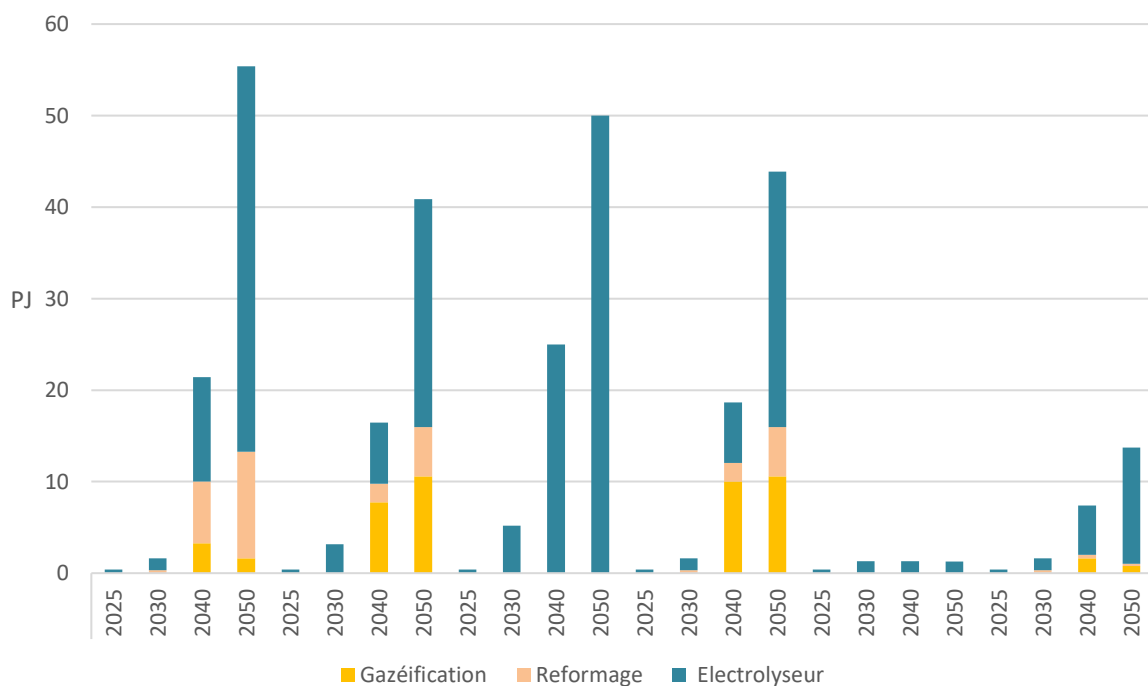


Figure 42 : Production d'hydrogène par technologie

Le niveau de production le plus important d'hydrogène est atteint dans le scénario *Autonomie*, soit 55 PJ, en raison de l'importante consommation du gaz de synthèse dans l'industrie et dans les secteurs résidentiel-tertiaire et de l'hydrogène dans le secteur du transport. Dans l'Annexe 8, la production est donnée par zone d'étude. Ainsi, la zone principale de production d'hydrogène dans tous les scénarios est AHP, en utilisant des électrolyseurs alcalins de grande taille centralisés car cela permet de bénéficier d'économies d'échelles. Les technologies d'électrolyse PEM ne sont choisies dans aucun des

scénarios. Ce qui motive la production dans cette zone est principalement la présence de la cavité saline qui sert de stockage d'hydrogène. En effet, plus de 50 % de la production dans chaque scénario est stockée dans ces cavités pendant la production qui a lieu la journée, et elle est ensuite utilisée pendant la nuit. Cela montre l'importance que cette option de stockage présente dans la transition énergétique de la région car cela permet une flexibilité accrue du système. De plus, dans tous les scénarios, l'hydrogène qui est utilisé dans le secteur du transport est livré à la consommation finale, d'abord à travers des canalisations, ensuite l'hydrogène est conduit vers une station de remplissage par le biais de camions. La gazéification de la biomasse pour la production d'hydrogène est quant à elle développée notamment dans les zones à forte consommation (AM1, BDR1 et VAR1) tandis que le reformage de la biomasse l'est dans les zones à faible consommation (HA et AM2). Dans le scénario *Sraddet*, où il y a une production d'hydrogène de 13 PJ, la production est issue d'électrolyseurs de moyenne taille et la production s'opère dans les zones VAUC et AHP, chacune représentant 36 % de la production. Dans ce cas, ni le reformage ni la gazéification se sont développés.

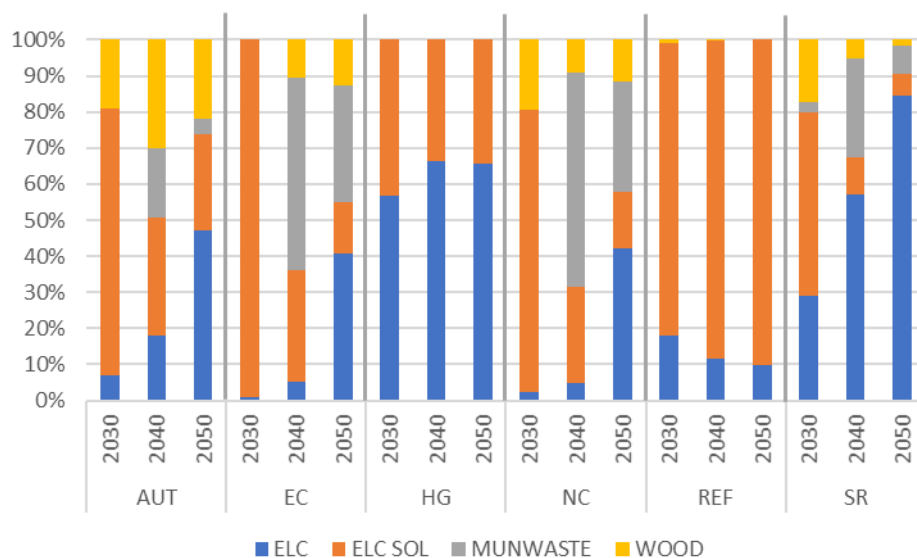


Figure 43 : Entrants pour la production d'hydrogène par scénario

Comme mentionné auparavant, on observe une importante production et consommation du gaz de synthèse dans les différents scénarios. La production de cette énergie s'opère par méthanation et à travers la gazéification. Ainsi, la méthanation, en utilisant du CO₂ industriel, compte pour la plupart de la production dans tous les scénarios (Figure 44). Cette méthanation a lieu dans les zones où le CO₂ a été capturé, zone AM1 pour le secteur du ciment et BDR1 pour la sidérurgie, le gaz de synthèse est aussi principalement consommé dans ces zones. La gazéification pour la production du gaz de synthèse utilise aussi du CSR, et dans tous les scénarios, les potentiels de CSR sont majoritairement utilisés pour la production du gaz soit de l'hydrogène soit du gaz de synthèse. Ainsi, ces ressources se montrent très importantes pour atteindre les objectifs de transition énergétique de la région. D'ailleurs, elles étaient déjà visées car on peut déjà observer dans le scénario de *Référence*, l'utilisation de ces ressources à travers la gazéification pour la production du gaz de synthèse. Ce qui pousserait davantage ce développement dans ce scénario serait alors la taxe carbone.

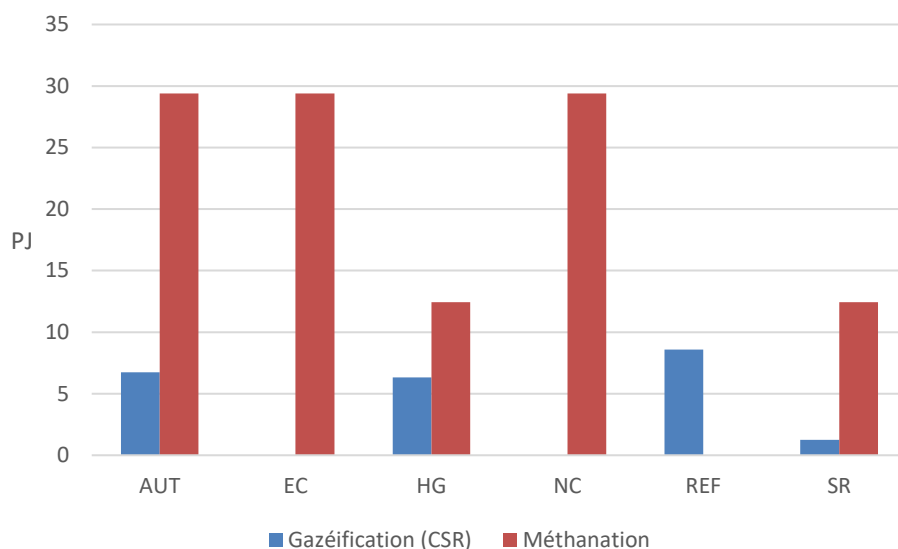


Figure 44 : Production du gaz de synthèse par scénario en 2050

A noter que dans l'Annexe 9, nous proposons une représentation de la production du biogaz dans la région par scénario et par type d'énergie utilisée. Ainsi nous pouvons observer que dans les zones à faible consommation, les potentiels de déchets verts, déchets agricoles et boues de STEP sont utilisées au maximum dans tous les scénarios pour la production du biogaz à travers la méthanisation. Les zones à haute consommation sont celles qui demandent le plus du biogaz. De plus, alors que la zone BDR2 se positionne comme principale exportatrice de cette ressource, VAUC se présente comme la plus productrice. La gazéification de la biomasse pour la production du gaz renouvelable a lieu principalement, pour les zones à faible consommation, dans les zones AM2 et AHP, et pour celles à haute consommation, dans VAR1. Dans les scénarios *Autonomie*, en raison de l'important besoin en gaz renouvelable, et *Circularité*, qui maximise la récupération d'énergie, environ 20 % du gaz renouvelable est purifié avec captage du CO₂. Ce dernier est mélangé avec de l'hydrogène fatal (tout le potentiel est utilisé) pour produire du biométhane. On notera qu'il reste encore 80 % du biogaz renouvelable qui pourrait être purifié avec captage du CO₂ pour être mélangé avec de l'hydrogène et remplacer la consommation d'énergies fossiles dans la consommation finale.

5.3. Analyse de sensibilité - Nouvelles politiques énergétiques

Après avoir analysé les différentes trajectoires de transformation du système énergétique de la région posées par les six scénarios proposés, nous avons repéré quelques politiques, au vu des résultats obtenus, qui pourraient favoriser la transition énergétique bas carbone de la région et parvenir à une plus ambitieuse décarbonation du système énergétique. Ainsi, dans cette section, nous proposons de les développer ces perspectives complémentaires, de les intégrer dans un scénario alternatif de sensibilité et d'en discuter les résultats.

5.3.1. Points de discussion pour de nouvelles politiques

Dans le secteur de l'habitat, au vu des résultats des différents scénarios, il conviendrait de mobiliser au minimum 80 % du potentiel de rénovation de bâtiments, étant évident qu'un objectif de 100 % serait à privilégier. Ainsi, si on considère le scénario *Neutralité* qui mobilise 80 % du potentiel de rénovation, il était alors possible de couvrir les besoins des secteurs résidentiel-tertiaire avec des

ressources renouvelables locales, notamment par le biais d'une mobilisation plus importante de technologies de récupération de chaleur. Également, une priorité doit être donnée à la fin de l'utilisation des énergies fossiles dans ce secteur et motiver l'utilisation du gaz renouvelable. Dans cette optique, il faut aussi limiter l'utilisation du gaz de synthèse qui utilise du CO₂ d'origine non renouvelable dans les secteurs résidentiel et tertiaire. En outre, comment présenté, la mobilisation de la chaleur fatale pour couvrir une partie de besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire permet de réduire la consommation du bois, ressource pouvant alors être réorienter pour d'autres usages, comme la production d'électricité ou la production d'hydrogène. La meilleure manière d'utiliser cette ressource serait alors à travers la gazéification de la biomasse car cela produit directement de l'hydrogène et réduit les besoins électriques et les soutirages du réseau électrique français. Enfin, toujours pour le secteur résidentiel-tertiaire, l'utilisation de batteries favoriserait l'introduction de la production solaire en toiture, en même temps qu'elle faciliterait la création d'un marché reposant sur la réutilisation des batteries en fin de vie, présentant une acceptation plus importante. Ainsi, passer d'une mobilisation de 10 % des batteries de fin de vie à 25 % semble un objectif plus intéressant qui pourra aider la transition énergétique et d'économie circulaire de la région.

Dans le secteur du transport, une première recommandation serait d'augmenter la part modale des vélos à assistance électriques et des trottinettes électriques à hauteur d'où moins 7 % des véhicules particuliers dans les zones à haute consommation et 5 % dans les zones à faible consommation. Cibler des objectifs plus ambitieux semble très compliquées car les VAE entre en compétition, pour des courtes distances, avec des véhicules électriques plus confortables, polyvalents quant aux déplacements et performants. En outre, il faut poursuivre l'augmentation de l'électrification du secteur principalement avec des véhicules particuliers et utilitaires électriques et cibler le déploiement de l'hydrogène dans le secteur du transport de marchandises particulièrement des poids lourds. Dans ce contexte, on se propose de cibler une production d'hydrogène pour le secteur du transport d'au moins 40 PJ, ce qui permettra de couvrir les besoins énergétiques des poids lourds et une partie de la consommation d'autres véhicules. Ensuite, il faut compléter la décarbonation de ce secteur par l'électrification des véhicules utilitaires et le développement du gaz renouvelable. Nous ne voulons pas utiliser du gaz naturel dans ce secteur car le déploiement d'options non renouvelables pourrait freiner le développement de technologies propres (IRENA, 2020a).

Pour le secteur de l'industrie, les efforts de déploiement du CUC dont nous avons pu observer l'impact favorable pour la décarbonation du système à travers la récupération du CO₂ et son utilisation pour remplacer les produits pétroliers et le gaz naturel, sont à soutenir. Ensuite, il conviendrait d'avoir une électrification du secteur d'où moins de 50 % de la consommation d'énergie final comme suivi dans le scénario *Neutralité*. Finalement, on compte aussi sur la mobilisation des potentiels de CSR pour la production d'hydrogène.

5.3.2. Scénario « Nouvelles politiques » (NP)

Nous proposons ainsi de tester les politiques proposées dans la section précédente et qui émanent des résultats des scénarios analysés, pour discuter les effets sur le système énergétique de la région. Ainsi dans le Tableau 50, nous récapitulons les hypothèses choisies pour l'analyse de ce scénario.

Nouvelles politiques				
Habitat	Rénovation des bâtiments	Minimum 80 %		
	Biomasse	Max 10 PJ		
	Gaz	Consommation seulement du gaz renouvelable en 2050		
	Biofuel	Peut être utilisé pour remplacer les énergies fossiles servant pour les autres usages énergétiques		
	Géothermie	Max 16 PJ		
	Aérothermie	5 8300 Unités par an (10% de plus que ce qui est fixé dans le scénario de référence)		
	Réseaux de chaleur	Mobilisation maximale du potentiel		
Transport	Gaz	Seul le biogaz peut être consommé		
	Véhicules électriques	Zones à faible consommation	Min 40% et max 80% du total de Véhicules particuliers	
		Zones à forte consommation	Min 60% du total de Véhicules particuliers	
	Produits pétroliers	-90 % par rapport à 2017 en 2050		
	Personnes par véhicule particulier	1.7	En 2050	
	Véhicules à mobilité individuel (vélos / trottinettes)	Zones à faible consommation (10% trottinettes - 90% VAE)	Au moins 5 % des véhicules particuliers en 2050	
		Zones à forte consommation (30% trottinettes - 70% VAE)	Au moins 10 % des déplacements de véhicules particuliers	
	BUS	10% en 2050 de déplacements de véhicules particuliers		
		10% en 2030 et 20% en 2050		
	Biofuel	Max 20 PJ	Doublé par rapport à l'année de base	
Véhicules utilitaires	Au moins 50 % des véhicules à électricité			
Consommation hydrogène	Au moins 40 PJ			
Industrie	Au moins 50 % d'électrification du secteur			
	CUC	Dans l'industrie du ciment de AM1 et pour la production de fer brut dans la sidérurgie de BDR1		
Stockage en batteries	25% du potentiel des batteries en fin de vie			
Electricité provenant du réseau français	-80% en 2050 par rapport à 2017			
Gaz provenant du réseau gazier français	-0.9 en 2050 par rapport à 2017			
Développement de projets power to gaz et intégration du plan hydrogène				
Secteur électrique	Biogaz	Max	Max 30 PJ	
		Bas	2.32	
	Biomasse	Max	8	
		Bas	1.43	
	Éolien	Max	10 PJ	
		Bas	0.59	
	Hydroélectricité	Max	35	
		Bas	29.13	
	Déchets ménagers	Max	2.3	
		Bas	1.53	
Solaire photovoltaïque	Sol	Au moins développement de 75 % des potentiels		
	Toiture	Au moins développement de 75 % des potentiels		
Energie des mers	GW	3 PJ		
Fossiles	Pas de nouvelles centrales			
Production hydrogène	Biomasse pour H2	Mobilisation maximale de 40 % de potentiels		
	CSR pour H2	Possibilité de mobiliser tous les potentiels		
	Electrolyseurs	Au moins production de 50 PJ		

Tableau 50 : Hypothèses établies pour le scénario nouvelles politiques

Nous voulons également ajouter deux analyses de sensibilité. La première consiste à prendre en compte un changement du taux d'actualisation de 4 % à 8 % (NP_8%). La seconde consiste à étudier les effets d'une variation de la demande énergétique sur l'évolution du système énergétique régional. Bien qu'il ne nous ait pas été possible de récolter des données spécifiques, nous cherchons à construire une demande qui prenne en compte les effets de la crise sanitaire sur la demande énergétique (NP_CVD). En effet, les mesures de confinement qui ont été prises en France depuis février 2020 ont fortement impacté la consommation énergétique. Nous détaillons dans le Tableau 51, les facteurs de variations issues de la pandémie, tels qu'identifiés par (Caumel & Maïzi, 2020).

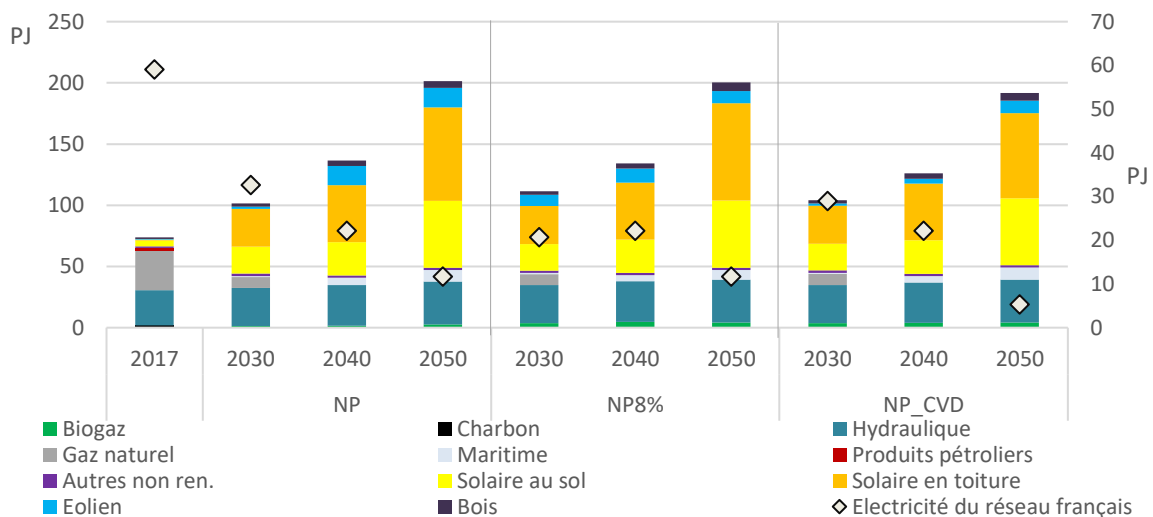
Secteur	Industrie	Tertiaire	Résidentiel	Transport individuel	Transport collectif	Transport de marchandises	Navigation	Aviation
Facteur de variation	-3.9	-3.1	0.55	-8.5	-10.1	-3.8	-2.7	-10.4

Tableau 51 : Facteurs de variation de la demande énergétique en France en raison de la crise sanitaire

Nous avons ainsi appliqué ces facteurs à partir de la demande projetée à 2020 pour le niveau de demande de 2050, tel que ces niveaux de 2050 consistent aux niveaux de 2020 réduits des facteurs de variations. Ainsi, nous considérons que les mesures prises pendant la crise sanitaire marquent un précédent qui exprime les modifications des comportements que la société pourrait ou devrait suivre progressivement dans un objectif ambitieux de transition énergétique et d'économie circulaire. En effet sans un changement drastique de comportements la transition énergétique bas carbone peinera à atteindre ses objectifs (Le Gallic, 2018).

5.3.3. Analyse des résultats

5.3.3.1. Le secteur électrique



Les changements les plus significatifs dans ces analyses de sensibilité s'observent dans le secteur électrique (Figure 45). Tout d'abord, le scénario *Nouvelles politiques* atteint un niveau de production plus élevé par rapport aux scénarios précédents avec 212 PJ (4 % plus élevée que celle du scénario *Autonomie*) avec un développement important de l'éolien en mer, soit 5 PJ (dans AM1 et BDR1) et de

l'électricité provenant de la combustion de la biomasse, soit 6 PJ (production doublée par rapport aux scénarios précédents) principalement dans BDR1 (la zone concentrant 24 % de cette production).

Le choix d'un taux d'actualisation plus important (scénario *NP_8%*) remet en question le développement de l'éolien en mer qui n'est pas développé et celui de l'énergie des mers qui présente alors une production de 15 % plus basse que celle du scénario *Nouvelles politiques (NP)* ou le scénario *NP_CVD*. Cependant, la production du biogaz, du solaire en toiture et du bois est favorisée (respectivement 55 %, 5 % et 25 % plus élevée que dans le scénario *Nouvelles politiques*). Dans ce cas, 30% de la production électrique provenant de la combustion de la biomasse provient de AHP et 19 % de AM1. Enfin, la production électrique finale dans le scénario avec un taux d'actualisation plus important est similaire à celle du scénario *Nouvelles politiques*. Dans les deux scénarios, une consommation de l'électricité provenant du réseau est toujours observée en 2050. Il en résulte ainsi que de réduire complètement l'électricité provenant du reste de la France (et donc s'isoler du réseau national) ne semble pas la meilleure option car l'électricité provenant du reste de la France restera moins chère et développer des capacités additionnelles n'est d'une part pas économiquement plus rentable, car pour couvrir la consommation électrique régionale avec une production locale, il faudra développer des technologies plus chères comme l'éolien en mer ou mobiliser les potentiels solaire au sol sous enjeux forts, ce qui n'est, d'autre part, pas écologiquement recommandé selon (Cerema Méditerranée, 2019). Il reste l'option de développer davantage la production solaire en toiture, cependant nous pouvons observer que cette filière n'est pas développée de façon plus importante par rapport aux scénarios précédents, même avec une disponibilité plus importante des batteries. En effet, l'utilisation de batteries atteint un niveau maximum de stockage, à hauteur d'environ 30 % de la production solaire en toiture, soit 21 PJ ou 23 000 batteries de véhicules particuliers électriques. Ce niveau d'utilisation de batteries est aussi celui observé dans le scénario *Circularité* par exemple.

Avec une demande suivant les effets de la pandémie, la production électrique est plus faible de 9 %. Affectant principalement la filière photovoltaïque en toiture (-9 % par rapport au scénario *Nouvelles politiques*) et favorisant la production provenant de la biomasse et du biogaz qui trouve une production similaire que dans le cas où s'applique un taux d'actualisation plus important. En outre, l'électricité provenant du réseau français est aussi plus faible par rapport à ces deux derniers scénarios.

5.3.3.2. Consommation d'énergie finale

Tout d'abord, avec une application de *Nouvelles politiques* et avec un taux d'actualisation plus important, la consommation d'énergie finale est réduite de 14 % en 2050 par rapport à 2017, autrement dit une réduction similaire à celle observée dans le scénario *Circularité*. Par contre, avec l'application de la nouvelle demande énergétique, la consommation est réduite de 23 % en 2050 par rapport à 2017. Ce qui montre qu'il faut intégrer de vrais changements de comportement pour arriver à une consommation plus durable.

En outre, la consommation de biogaz produit localement atteint dans le scénario *Nouvelles politiques* un niveau plus important (31 PJ) par rapport aux scénarios précédents, principalement par rapport au scénario *Autonomie* qui présentait une consommation de biogaz produit localement de 24 PJ. Ce qui souligne l'intérêt de réutiliser le CO₂ issu de la purification du gaz lui-même issu de la méthanisation. Ce biogaz est utilisé dans tous les secteurs finaux de consommation. Dans le secteur résidentiel, il s'utilise plutôt pour la cuisson, tandis que dans l'industrie, il s'utilise principalement pour le secteur de la chimie, et dans le transport, notamment pour les poids lourds. Cependant, l'application d'un taux

d'actualisation plus important conduit à une consommation de biogaz de 12 % plus basse par rapport à le scénario NP. Une consommation similaire est observée dans le cas d'une demande « pandémique ».

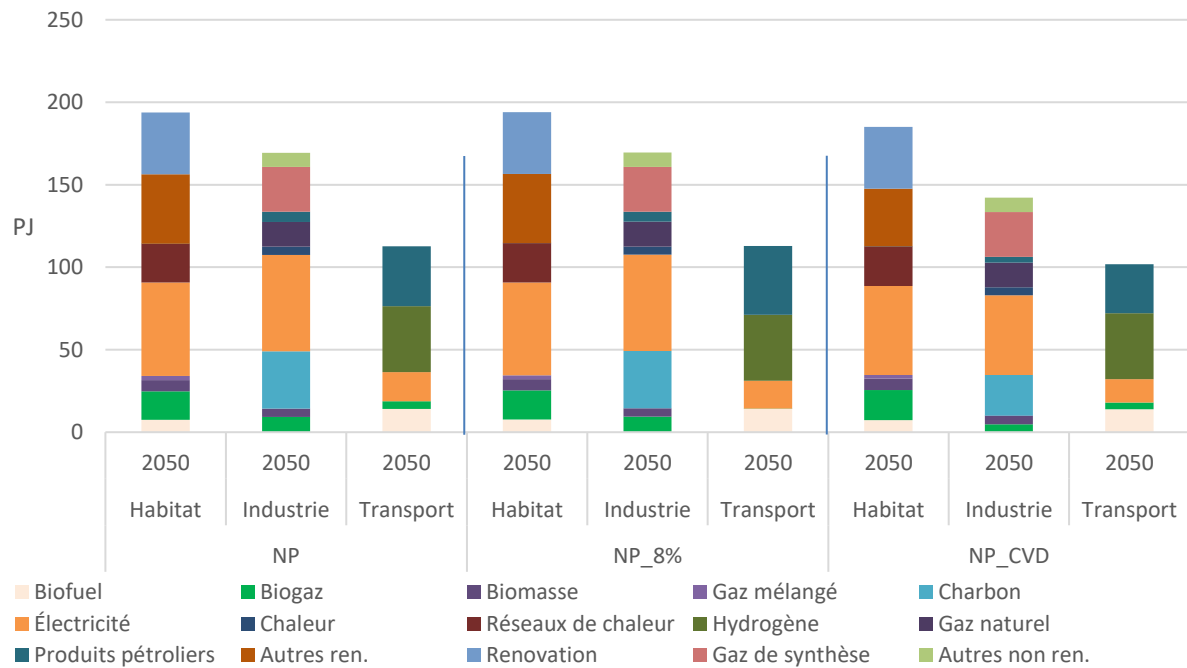


Figure 46 : Consommation énergétique par secteur final de consommation à l'horizon 2050 par type d'énergie pour les scénarios NP, NP_8% et NP_CVD

Les principales différences en termes de consommation énergétique s'observent dans le secteur du transport, en particulier au niveau des poids lourds (Figure 47). Dans le cas d'un taux d'actualisation plus élevé, l'utilisation de l'hydrogène par les poids lourds devient moins rentable. Dans le scénario NP_8% par rapport au scénario NP, on observe 10 % de moins de poids lourds utilisant de l'hydrogène, le biofuel remplace alors l'hydrogène et couvre 31% de la consommation de ce type de véhicule. Dans ce contexte, il en résulte une moindre utilisation du biofuel pour les véhicules particuliers et utilitaires. Le biogaz est également affecté par la hausse du taux d'actualisation et n'est plus utilisé par de secteur du transport dans le scénario NP_8%.

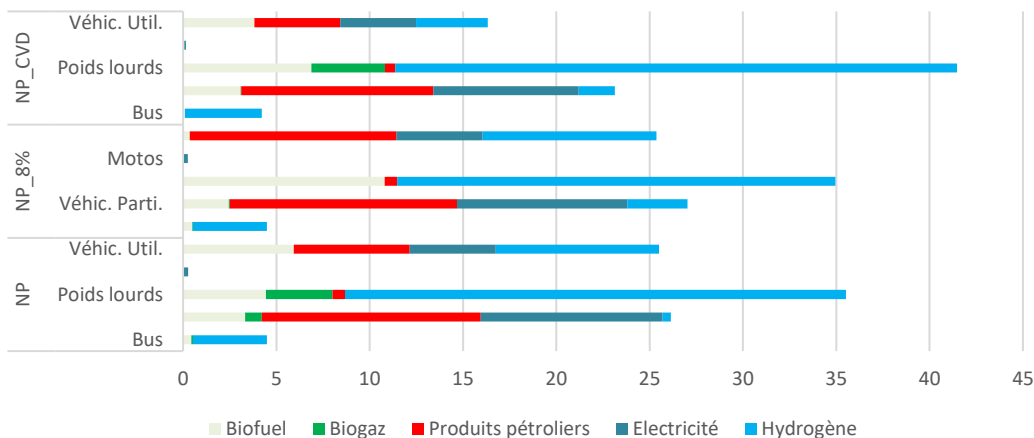


Figure 47 : Consommation énergétique par type de véhicule pour les scénarios NP, NP_8% et NP_CVD

5.3.3.3. Production d'hydrogène

La production d'hydrogène atteint son niveau de développement le plus haut dans ces scénarios, atteignant alors 72 PJ. Ce niveau de production ne varie pas avec un taux d'actualisation plus élevé, ni avec un niveau de demande différent. On retrouve donc AHP comme pôle principal de production d'hydrogène permettant de capter la production excédentaire électrique de la région. Le reformage de la biomasse a une production plus distribuée entre les territoires de la région et atteint également des niveaux plus élevés par rapport aux scénarios précédents. Le recours au stockage affiche une différence lors d'un taux d'actualisation plus haut et une demande pandémie. Dans le premier cas, il diminue de 10 % par rapport à ce qui ressort dans le scénario *Nouvelles politiques* (20 PJ), et dans le second cas, il est plus faible de 25 %.

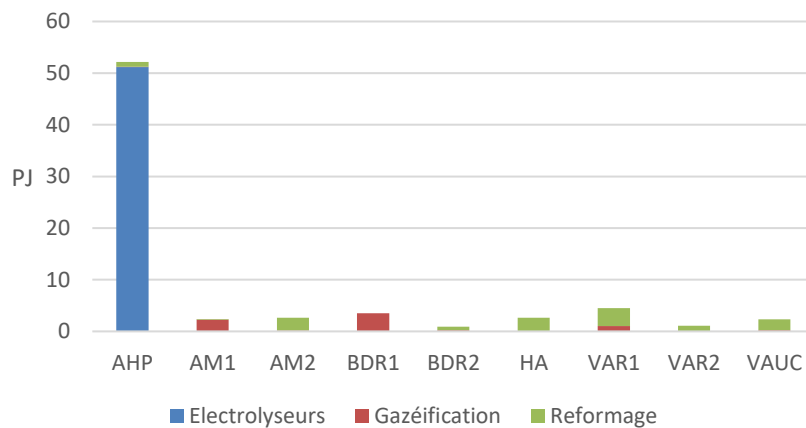


Figure 48 : Production d'hydrogène dans les scénarios *Nouvelles Politiques*, NP 8% et NP_COV

5.3.3.4. Emissions de gaz à effet de serre

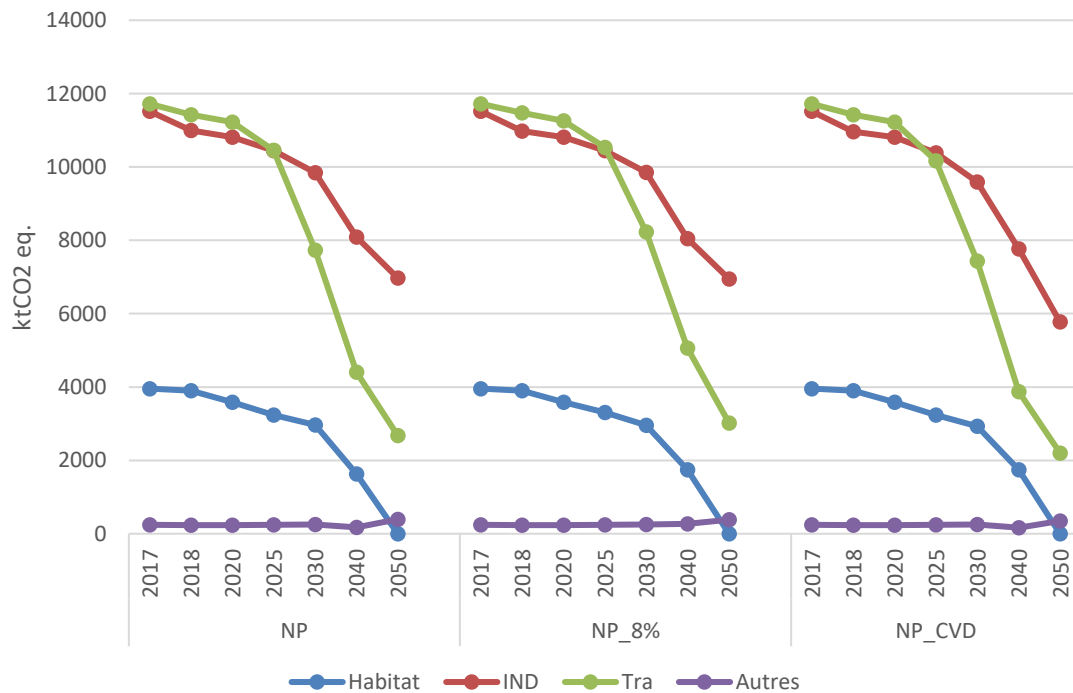


Figure 49 : Emissions des gaz à effet de serre pour le scénario *Nouvelles Politiques*, Taux d'actualisation 8 % et avec une demande pandémie

Dans le scénario *Nouvelles politiques*, on observe une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 63 % en 2050 par rapport à 2017, tandis qu'avec un taux d'actualisation plus élevé, le niveau des réductions baisse de 1 %. En appliquant une demande « pandémie », la réduction des émissions de gaz à effet de serre atteignent 70 % en 2050 par rapport à 2050. Ainsi, le scénario *Nouvelles politiques* en appliquant une demande pandémie se positionne en deuxième place après le scénario *Neutralité*, en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Il reste ainsi des efforts à réaliser pour réduire les émissions de gaz à effet de serre restant et arriver à une neutralité carbone. Pour cela, développer davantage les ressources locales semble très coûteux et il faudra vraiment cibler des stratégies d'incitation à des comportements durables.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé à travers différents scénarios les possibles trajectoires de transition énergétique bas carbone et d'économie circulaire de la région SUD PACA. A travers cette analyse nous avons répondu aux questions formulées au début de ce chapitre. Nous avons observé que pour arriver à une transition énergétique et d'économie circulaire, il faudra une synergie entre les territoires de la région. Les zones à faible consommation se sont positionnées comme productrices nettes d'énergie, notamment AHP qui est un territoire clé pour aider la transition énergétique et d'économie circulaire à travers le stockage d'hydrogène qui permet d'absorber la production solaire du territoire local et la production électrique des autres territoires.

En outre, l'application d'une économie circulaire permet une décarbonation plus profonde de la région à travers la récupération de l'énergie fatale qui est utilisée dans les secteurs résidentiel et de l'industrie, à travers la réutilisation du CO₂ qui se mélange avec de l'hydrogène pour produire du gaz de synthèse ou du biométhane (quand le CO₂ à un origine biogénique) et la réutilisation de batteries de véhicules électriques en fin de vie qui permet un meilleur développement de la filière solaire en toiture, cela requière la création d'un marché de ce genre de produits à partir de 2030. Cependant l'utilisation du gaz de synthèse produit à partir du CO₂ à origine fossile doit s'utiliser dans les secteurs où d'autres ressources ont du mal à se positionner, notamment dans le secteur de l'industrie. De plus, des actions pour réduire la demande énergétique sont clés pour arriver vers une transition énergétique bas carbone et d'économie circulaire.

Les technologies P2G se positionnent comme polyvalentes dans la transition énergétique et d'économie circulaire de la région, d'abord car leur développement permet l'absorption de l'électricité excédentaire produite par la région par la production d'hydrogène. Cet hydrogène sert à décarboner le secteur du transport et permet la réutilisation du CO₂. Ainsi, il conviendrait de ne pas diversifier la production d'hydrogène et de cibler son utilisation dans un secteur spécifique pour contribuer à sa spécialisation. Se concentrer dans le secteur du transport de marchandises est la meilleure opportunité pour développer l'hydrogène dans la région et à travers la production du gaz de synthèse. Les politiques établies par la région pour le développement de l'hydrogène ne sont pas suffisantes pour promouvoir le développement de l'hydrogène, ce que nous avons remarqué avec le faible usage de cette ressource dans le scénario *Sraddet*. De plus, nous avons montré qu'une autonomie de la région était possible par rapport aux réseaux électrique et gazier. Finalement, nous avons donné des recommandations de politiques à mettre en place pour la transition énergétique et d'économie

circulaire de la région. Dans cette optique d'ailleurs, il apparaît essentiel de fixer des objectifs de décarbonation clairs et spécifiques pour bien cibler les ressources à utiliser dans chaque secteur de consommation.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est centré sur la transition énergétique et d'économie circulaire des territoires dont nous avons montré le rôle incontournable à jouer par ces acteurs pour la réalisation de ces enjeux. Une grande partie des solutions à apporter à cette fin sont mises en œuvre au niveau local, comme le développement des énergies renouvelables, notamment décentralisées, la mise en place d'actions spécifiques en matière de mobilité ou encore d'efficacité énergétique, s'inscrivant dans des champs de compétences détenues par les collectivités locales comme l'urbanisme et le transport. Pour contribuer à la discussion sur le rôle des collectivités locales dans la transition énergétique et d'économie circulaire des systèmes énergétiques, nous avons exploré cette question dans le cadre de la Région SUD PACA en nous inscrivant dans l'approche de la modélisation prospective des systèmes énergétiques. Un modèle TIMES SUD PACA a été construit à cette fin et pour explorer les possibles sentiers de transition énergétique et d'économie circulaire que la région pourrait suivre pour répondre à l'objectif de neutralité carbone qu'elle s'est fixé à long terme. Nous avons ainsi pu identifier différents moyens (technologies, ressources, actions d'économie circulaire) pour y parvenir et certains points de vigilance à considérer.

Apport et recommandations

Ainsi, les résultats de notre étude ont mis en avant que la mise en place d'une stratégie d'économie circulaire pouvait contribuer à favoriser la transition énergétique bas carbone de la région à travers l'application de ses principes fondamentaux, « réduire, réutiliser, recycler et valoriser ». Dans le secteur résidentiel-tertiaire, le développement des technologies de récupération de chaleur, de la chaleur ambiante, de la géothermie à travers des pompes à chaleur, ainsi que des réseaux de chaleur visant à récupérer la chaleur fatale était particulièrement à privilégier. Le déploiement de la récupération de chaleur pourrait notamment également permettre d'économiser d'autres ressources énergétiques, principalement le bois utilisé pour le chauffage. Ce bois pourrait par exemple alors être alloué à la production d'électricité, ou à la production d'hydrogène à travers la gazéification. La récupération des batteries de véhicules électriques apparaît aussi comme une solution intéressante pour favoriser la transition énergétique et d'économie circulaire de la région, à travers notamment le développement de la filière solaire en toiture. Cette option apporterait une valeur additionnelle à l'utilisation des véhicules électriques. Il faudrait par contre établir le plus tôt possible les bases pour la création d'un marché pour la récupération et réutilisation de ce genre de batteries.

La méthanation apparaît jouer un rôle clé dans la décarbonation du système énergétique régional en particulier dans le secteur de l'industrie. Dans une perspective d'économie circulaire, il est possible de réutiliser le CO₂ issu de la purification du biogaz et des activités industrielles pour la production du biométhane et du gaz de synthèse et ainsi remplacer les produits pétroliers et le gaz naturel utilisés dans l'industrie. Il faudrait alors prioriser la réutilisation du CO₂ issu de la purification du biogaz pour garantir la réduction d'émissions de GES, ce qui renforcerait également le déploiement du biogaz dans la région. Le gaz de synthèse produit en utilisant du CO₂ d'origine non renouvelable ne devrait cependant n'être considéré que dans le cadre de la décarbonation du secteur de l'industrie car sa combustion produit des émissions de GES (environ 14 % de moins que le gaz naturel). De plus, la production du gaz de synthèse permet une utilisation accrue de l'hydrogène favorisant par là-même

le développement de la production solaire au sol et la mobilisation d'autres ressources pour la production d'hydrogène comme les combustibles solides de récupération.

L'hydrogène apparaît quant à lui essentiel dans le cadre d'une décarbonation ambitieuse du système énergétique de la région car d'une part, combiné à du CO₂, il permet la production de biométhane et du gaz de synthèse et d'autre part, il apparaît comme le vecteur énergétique permettant la décarbonation du secteur du transport, et en particulier des poids lourds pour lesquels l'électricité connaît des problèmes à répondre aux contraintes d'usage. L'hydrogène contribue également au déploiement de la production photovoltaïque régionale à travers des électrolyseurs qui profitent de la production de panneaux photovoltaïques. Les Alpes-de-Haute-Provence (AHP) représente alors un territoire stratégique pour le développement de la filière hydrogène grâce à ses cavités salines pouvant stocker l'hydrogène. Ainsi, il faudrait cibler l'hydrogène pour la méthanation et le secteur du transport et, dans une moindre mesure, viser à l'injecter dans le réseau gazier car cela ne contribue pas significativement à la création d'une demande pour ce vecteur.

Pour atteindre un système énergétique circulaire dans la région, il faudrait accompagner le développement de la production des énergies renouvelables en promouvant des comportements moins énergivores et ainsi réduire sa consommation énergétique et son empreinte carbone. Ce point apparaît d'autant plus crucial que la région accuse un retard important par rapport aux autres régions françaises quant à son empreinte carbone par habitant qui demeure au-dessus de 10 tCO₂eq en 2020⁴⁴. Des solutions sont apparues stratégiques à cet égard et consistent dans l'utilisation de vélos et trottinettes à assistance électrique et le covoiturage. Cependant, les objectifs établis dans le SRADDET apparaissent insuffisants pour faire face à une demande énergétique croissante en raison du développement économique et de la croissance démographique de la région. Ainsi, il s'avère impératif de mettre en place des actions qui visent à changer – drastiquement – le comportement de individus par rapport à la manière dont ils conçoivent et consomment l'énergie.

Les efforts à fournir par la région afin d'atteindre ses objectifs de décarbonation sont encore très importants et l'économie circulaire se présente comme un levier incontournable pour atteindre la neutralité carbone visée. La région dispose d'importants potentiels de différentes ressources énergétiques mais il s'avère nécessaire de les gérer de manière optimale et d'allouer chacune d'elles stratégiquement, en les répartissant de manière réfléchie et pertinente selon les différents secteurs et zones de consommation, où doivent être distingués des enjeux spécifiques quant à leurs besoins et caractéristiques.

Enfin, les collectivités territoriales sont déterminantes pour atteindre les objectifs de décarbonation nationaux et internationaux, à travers la mobilisation de leurs ressources et l'adoption de politiques ambitieuses en matière de réduction d'émissions de gaz à effet de serre adaptées à leur contexte économique et démographique. Il s'avère en ce sens nécessaire de continuer à renforcer leurs capacités d'action et surtout d'accroître les moyens dont elles disposent, afin que la mise en œuvre de leurs politiques soit plus opérationnelle et rapide.

⁴⁴ <https://www.hellocarbo.com/empreinte-carbone-francais-2020-par-region/>

Limites de l'étude et perspectives

Ce travail de recherche prospective présente de nombreuses perspectives.

D'abord, l'intégration d'un découpage temporel plus fin permettrait de mieux analyser les équilibres offre-demande et le rôle des différentes technologies (batteries, électrolyseurs, stockage H₂) pour couvrir les intermittences des productions solaire et éolienne. Une telle analyse serait particulièrement intéressante pour regarder comment la production répond à la demande électrique aux heures de pic, notamment pendant l'hiver.

Par ailleurs, au vu des potentiels non exploités de ressources énergétiques dans la région, et notamment de solaire en toiture, il serait intéressant d'intégrer une option d'injection de l'électricité et du gaz produit localement aux réseaux électrique et gazier français et ainsi répondre aux besoins énergétiques du reste de la France. Cela permettrait de voir si ces débouchés éventuels n'inciteraient pas la région à développer de nouveaux moyens de production électrique jusqu'à utilisation de ses potentiels.

Concernant les véhicules électriques, l'inclusion de bornes de recharge pour ce genre de véhicules permettrait de mieux prendre en compte les autres investissements nécessaires à réaliser pour développer la filière dans la région.

Une autre piste de recherche intéressante consiste à explorer une utilisation de l'hydrogène pour la production d'autres types de ressources comme la production de méthanol. Cela permettrait d'étudier comment cela pourrait encourager davantage la production d'hydrogène régional.

Enfin, pour aborder l'économie circulaire de façon plus complète, il faudrait prendre en compte l'utilisation d'autres ressources pour le développement du secteur énergétique régional, notamment l'utilisation de l'eau et des métaux rares. Dans ce même esprit et dans une logique d'économie circulaire, il serait pertinent d'étudier les répercussions d'une augmentation de l'activité de l'industrie du recyclage dans la consommation énergétique régionale.

Annexes

Annexe 1 : Politiques énergétiques établies dans le SRADDET

Dès 2012, la région définit dans le SRCAE ses objectifs et orientations en matière de maîtrise de la demande d'énergie, de réduction des émissions des polluants atmosphériques et gaz à effet de serre, de développement des énergies renouvelables et d'adaptation au changement climatique. Après la loi NOTRe, ce schéma est inclus dans le SRADDET et c'est maintenant ce document qui guide l'évolution du système énergétique de la région SUD PACA. Les politiques concernant le secteur de l'énergie sont concentrées principalement selon deux axes : une réduction de la consommation d'énergie primaire de 50 % en 2050 (30 % de l'énergie finale) par rapport à 2012, et une augmentation de la production des énergies renouvelables qui puisse couvrir 110 % de la consommation finale d'énergie en 2050 (voir Tableau 52). L'objectif de ces politiques est d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

	2021	2023	2026	2030	2050	
Énergie primaire	Industrie	-21 %	-26 %	-33 %	-42 %	-50 %
	Résidentiel - tertiaire	-13 %	-16 %	-20 %	-25 %	-50 %
	Transports	-6 %	-8 %	-12 %	-17 %	-50 %
	Agriculture	-1 %	-1 %	-1.5%	-2 %	-50 %
	Total	-14 %	-17 %	-21 %	-27 %	-50 %
Énergie finale	-8 %	-9 %	-12 %	-15 %	-30 %	
Taux de couverture de la production renouvelable	17 %	19 %	25%	32 %	110 %	

Tableau 52 : Objectifs concernant l'évolution du système énergétique de la région SUD PACA

Dans cette section, l'objectif est d'exposer les différents objectifs que la région SUD PACA se propose pour atteindre la neutralité carbone.

Consommation par type d'énergie

Les objectifs de réduction de la demande sont détaillés par type d'énergie. Ces objectifs sont affichés à continuation :

Énergie \ Période	2020	2030
Produits pétroliers	-20%	-34%
Gaz naturel	-15%	-32%
Charbon	-8%	-16%
Électricité	-10%	-15%
Autres énergies ⁴⁵	-2%	-7%

Tableau 53 : Objectifs de réduction de la consommation d'énergie par type par rapport à 2007

Transport

Le secteur de transport est un des secteurs qui pollue le plus mais c'est aussi un des plus difficiles à décarboner. Plusieurs politiques ont donc été mises en place pour en réduire l'impact environnemental.

⁴⁵ Autres énergies : solaire thermique, chaleur et froid, déchets (hors biomasse), biomasse, biogaz.

Les principales politiques de la région pour décarboner le secteur du transport sont de mettre en place des solutions alternatives de transport pour inciter l'usage de modes de transport propres, comme le vélo et le covoiturage, augmenter l'usage des transports en commun, et inciter le renouvellement des véhicules utilisés en faveur de véhicules utilisant des énergies propres (biogaz, électricité, hydrogène, entre autres). La région s'est ainsi fixée comme objectif un changement modal de 15 % pour 2030, et plus particulièrement une augmentation de la part modale du vélo de 3 % en 2012 à 12,5 % en 2030.

Le Tableau 54 détaille les objectifs plus spécifiques pour l'ensemble du secteur du transport.

	Objectifs	2020	2030	
	Personnes par véhicule	1.32	1.35	
	% Véhicules électriques	4.0	8.0	%
Réduire la consommation d'énergie par tonne/km		-10.0	-20.0	%
	Conducteurs pratiquant l'éco-conduit	50.0	70.0	%
	Par modale des transports en commun	-	66.0	%
	Part modale pour les modes actifs (vélos, marche)	-	50.0	%
	Part modale ferroviaire	10.0	15.0	%
	Part modale fluviale	2.5	3.0	%
% des déplacements par vélos dans les centres urbains		-	50.0	%
	Véhicule hybride/électrique	-	50.0	%
	Part modale du transport en commun (centre-ville)	-	23.0	%
	Part modale du transport en commun (banlieue)	-	12.5	%
	Part modale du transport en commun (zones peu denses)	-	6.0	%
	Véhicules utilitaires utilisant énergies propres	-	8.0	%
	% biocarburant dans la consommation du transport	0.075	10.0	%

Tableau 54 : Objectifs concernant le secteur du transport

Secteur de l'habitat

Le secteur dit « résidentiel et tertiaire » possède un des gisements les plus intéressants pour exploiter l'efficacité énergétique et faire des économies d'énergie. Pour cela, la région cible plusieurs points, en accord avec les mesures déployées dans le cadre du Plan National de l'habitat : la rénovation de 50 000 logements par an, et celle de 150 000 m² de surface pour le secteur tertiaire. La région a pour ce faire mis en place une aide à travers les Éco-prêts : il s'agit d'une aide pour les financements des travaux de rénovation à travers des prêts à taux zéro. D'autres objectifs sont détaillés dans le Tableau 55. La région a aussi ciblé l'usage de différents types d'énergies dans le secteur de l'habitat. Ces objectifs sont principalement centrés sur la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage et plus spécifiquement pour arrêter l'utilisation du fioul (voir Tableau 56).

Type d'usage \ Secteur	2020		2030		2050	
	Résidentiel	Tertiaire	Résidentiel	Tertiaire	Résidentiel	Tertiaire
Chauffage	-37%	-27%	-37%	-43%	-69%	-60%
Fioul			-25%	-25%		0%
Gaz				25%		48%
Électricité						40%
Biomasse						10%
Climatisation	0%	-19%	0%	-27%	0%	-31%
Cuisson	-6%	-14%	-6%	-18%	-10%	-27%
Eau Chaude	-2%	-16%	-2%	-27%	-20%	-44%
Électrique Spécifique/autres	-4%	-18%	-4%	-25%	-17%	-26%
Éclairage public		-15%		-24		-40

Tableau 55 : Objectifs chiffres pour le secteur de l'habitat

Résidentiel	50% des chauffages Biénergie remplacés par bois seul à 2025
	Diminuer la consommation des bâtiments existants de 38% à l'horizon 2025 par rapport à leur niveau de 2007
	Taux d'équipement des logements collectifs en Solaire Thermique pour l'Eau Chaude Sanitaire de 30 000 / an en 2025
	Atteindre 285 051 logements collectifs équipés en Solaire Thermique pour l'Eau Chaude Sanitaire entre 2007 et 2025
	Taux d'équipement des logements totaux en Solaire Thermique pour l'Eau Chaude Sanitaire de 75 000 / an en 2025
	Atteindre 712 551 logements totaux équipés en Solaire Thermique pour l'Eau Chaude Sanitaire entre 2007 et 2025
	100% des logements équipés en lampes basse consommation en 2025
	Taux de 30 000 de gestes de rénovation diffus an entre 2007 et 2025
	Atteindre 540 000 gestes de rénovation diffus entre 2007 et 2025
	Disparition des systèmes de chauffages au fioul en 2050
Tertiaire	Taux de rénovation énergétique de 3% des surfaces tertiaires privées / an en 2030
	Taux de rénovation énergétique de 7% des surfaces tertiaires publiques / an en 2030
	Atteindre un taux de besoin de refroidissement nul en 2030
	Diminuer les consommations liées au chauffage de 27% en 2020 et de 43% en 2030
	Diminuer les consommations liées à la climatisation de 19% en 2020 et de 27% en 2030
	Diminuer les consommations liées à la cuisson de 14% en 2020 et de 18% en 2030
	Diminuer les consommations liées à la production d'eau chaude de 16% en 2020 et de 27% en 2030
	Diminuer les consommations liées aux autres usages de 18% en 2020 et de 25% en 2030

Tableau 56 : Autres objectifs ciblant le secteur de l'habitat

Industrie

Les objectifs établis par la région pour le secteur industriel se concentrent spécifiquement sur la mobilisation du potentiel d'efficacité énergétique. La région envisage ainsi de mobiliser 50 % de l'efficacité énergétique à l'horizon 2020 et 100 % de ce potentiel d'ici à 2030.

Les principales hypothèses pour exploiter les gisements d'efficacité énergétique sont :

- Gain de 35 % sur les chaudières,
- Gain de 6 % sur les moteurs,
- Gain de 18 % dans l'industrie de la construction (ciment, chaux, tuiles...),
- Gain de 13 % dans la sidérurgie et la fonderie,
- Gain de 10 % pour les autres usages.

Pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, le remplacement de la consommation des produits pétroliers par celle du gaz naturel est privilégiée pour les chaudières industrielles et pour tout le secteur en général. Même s'il n'y a pas d'objectif envisagé pour l'usage de l'hydrogène ou d'autres développements technologiques pouvant aider à la réduction de l'empreinte carbone du secteur industriel, la région soutient la mise en place de solutions alternatives.

Production d'énergie

La politique principale déployée pour la production d'énergie dans la région PACA est d'augmenter la production des énergies renouvelables pour couvrir 100% de la consommation en 2050. Les principaux objectifs, pour le développement de différentes énergies renouvelables, sont détaillés dans le tableau suivant :

PUISSANCE (MW)		2012	2021	2023	2026	2030	2050
ÉLECTRICITÉ	Hydroélectricité	3,073	3,756	3,908	3,929	3,956	4,100
	Éolien terrestre	45	321	382	474	597	1,305
	Éolien flottant	-	236	289	594	1,000	2,000
	PV-Particuliers (<3kW)	65	334	394	448	520	2,934
	PV-Parcs au sol	531	6,578	2,684	2,755	2,850	12,778
	PV/Grandes toitures (>3kW)			5,238	6,576	8,360	31,140
	Grandes centrales biomasse	-	141	172	172	172	172
THERMIQUE	Récupération de chaleur	1,199	2,794	3,094	3,611	4,300	6,546
	Solaire thermique collectif	20	509	618	781	998	2,065
	Bois énergie collectif	80	177	198	242	300	544
	Méthanisation	14	71	84	162	267	570
	Gazéification	-	55	67	153	267	586
	Biomasse agricole (hors méthanisation)	-	175	214	272	350	739
	TOTAL Général	5,027	15,147	17,342	20,169	23,937	65,479
TOTAL Électrique	3,714	11,366	13,067	14,948	17,455	54,429	
TOTAL Thermique	1,313	3,781	4,275	5,221	6,482	11,050	

Tableau 57 : Objectifs concernant le développement du système de production de la région SUD PACA en MW

Pour arriver à développer les énergies renouvelables, la région se propose les stratégies suivantes :

- Solaire PV (total) - Installer 1200 MW par an
- Solaire PV (particuliers) - Équiper 173 000 toitures d'ici à 2030 et 978 000 d'ici à 2050, en privilégiant l'autoconsommation
- Solaire PV (parcs au sol) - Installer 2 850 hectares (1 995 terrains de foot ou 3 Ha / commune) d'ici à 2030 et 12 778 hectares (8 900 terrains de foot ou 13 Ha / commune) d'ici à 2050.
- Éolien terrestre - Installer 170 éoliennes de 3,5 MW d'ici à 2030 et 370 d'ici à 2050
- Éolien flottant - Installer 100 éoliennes de 10 MW d'ici à 2030 et 200 d'ici à 2050.
- Solaire thermique collectif - Installer 665 000 m² d'ici à 2030 et 1 375 000 m² d'ici à 2050.
- Solaire thermique collectif - Installer 11 100 équipements d'ici à 2030 et 23 000 d'ici à 2050.

- Bois énergie - Installer 750 chaufferies d'ici à 2030 et 1 360 d'ici à 2050.
- Méthanisation - Installer 330 unités d'ici à 2030 et 715 d'ici à 2050.

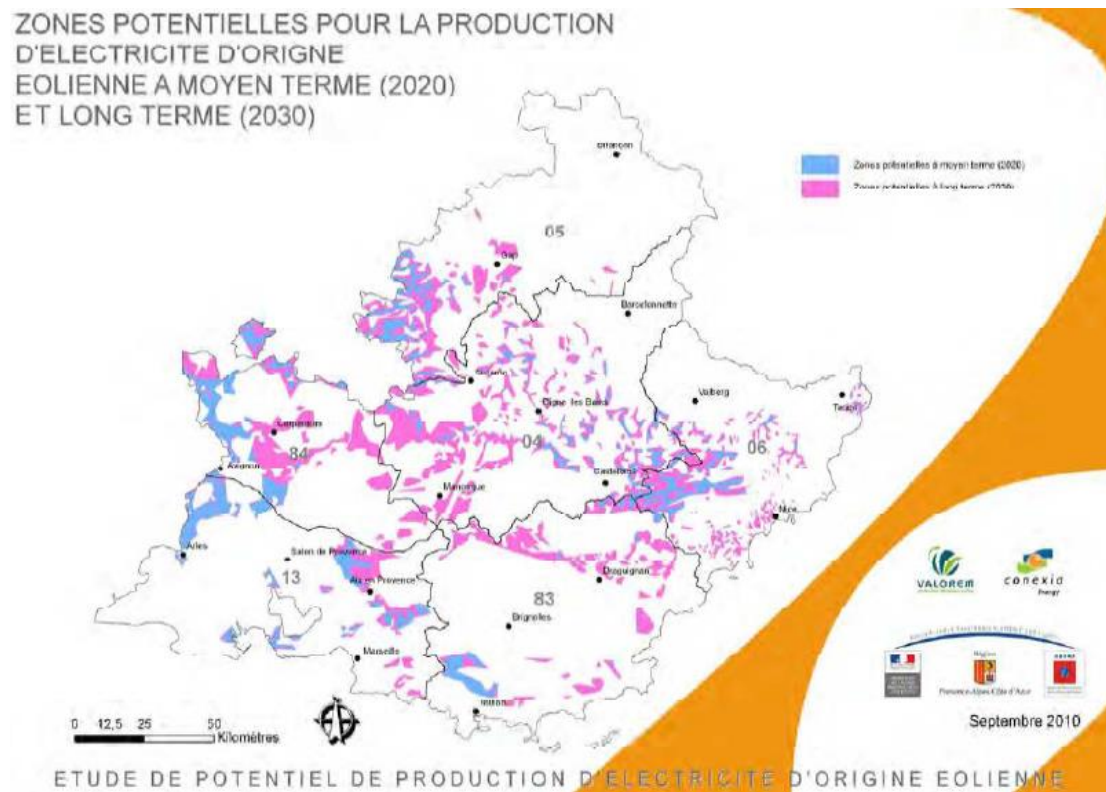
PRODUCTION (GWh)		2012	2021	2023	2026	2030	2050	
ÉLECTRICITÉ	Hydroélectricité	9,070	9,070	9,070	9,070	9,070	9,709	
	Éolien terrestre	116	829	988	1,228	1,547	3,000	
	Éolien flottant	-	952	1,163	2,379	4,000	8,000	
	PV-Particuliers (<3kW)	674	8,340	419	500	568	663	3,756
	PV-Parcs au sol			3,442	3,532	3,651	16,372	
	PV/Grandes toitures (>3kW)			6,709	8,423	10,709	39,895	
	Grandes centrales biomasse	-	1,056	1,291	1,291	1,291	1,291	
THERMIQUE	Récupération de chaleur	3,105	7,120	8,012	9,353	11,140	20,058	
	Solaire thermique collectif	81	538	640	804	1,023	2,070	
	Bois énergie collectif	209	457	512	626	779	1,419	
	Méthanisation	105	533	628	1,216	2,000	4,105	
	Gazéification	-	409	500	1,143	2,000	4,221	
	Biomasse agricole (hors méthanisation)	-	352	430	545	698	1,477	
	TOTAL Général	13,360	30,075	33,885	40,178	48,571	115,373	
TOTAL Électrique	9,860	20,666	23,163	26,491	30,931	82,023		
TOTAL Thermique	3,500	9,409	10,722	13,687	17,640	33,350		
Taux de couverture	6%	17%	19%	25%	32%	110%		

Tableau 58 : Objectifs de production pour le système énergétique de la région SUD PACA

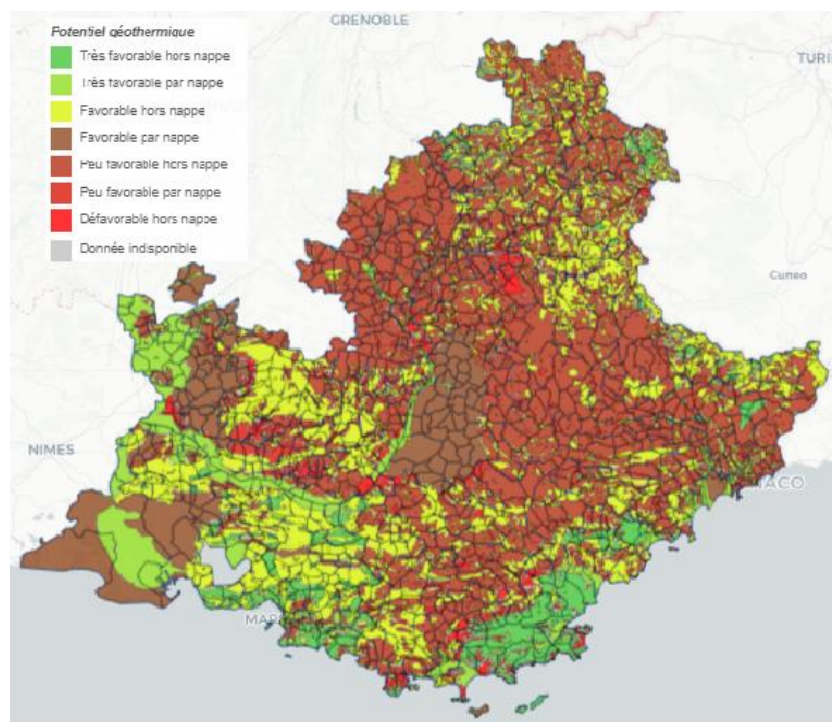
D'autres stratégies permettant de mieux profiter de la production des énergies renouvelables en 2050 sont :

- Développer la récupération de chaleur quelle que soit la source (géothermie, thalassothermie, chaleur fatale industrielle, data centers...) pour valoriser les ressources du territoire et limiter le gaspillage.
- Développer les solutions de stockage indispensables pour permettre la réalisation des objectifs énergétiques afin de pallier l'effet intermittent des énergies renouvelables (hydrogène, méthanation, batteries, etc.).
- Réduire de 20 % les consommations d'électricité d'ici fin 2020 dans l'est de la région (Var et Alpes-Maritimes).
- Porter la production locale d'EnR à 25 % des besoins d'ici fin 2020 dans l'est de la région (Var et Alpes-Maritimes).

Annexe 2 : Zones potentielles pour la production d'électricité d'origine éolienne en 2020 et 2030 (Valorem-Conexia Energy, 2010)



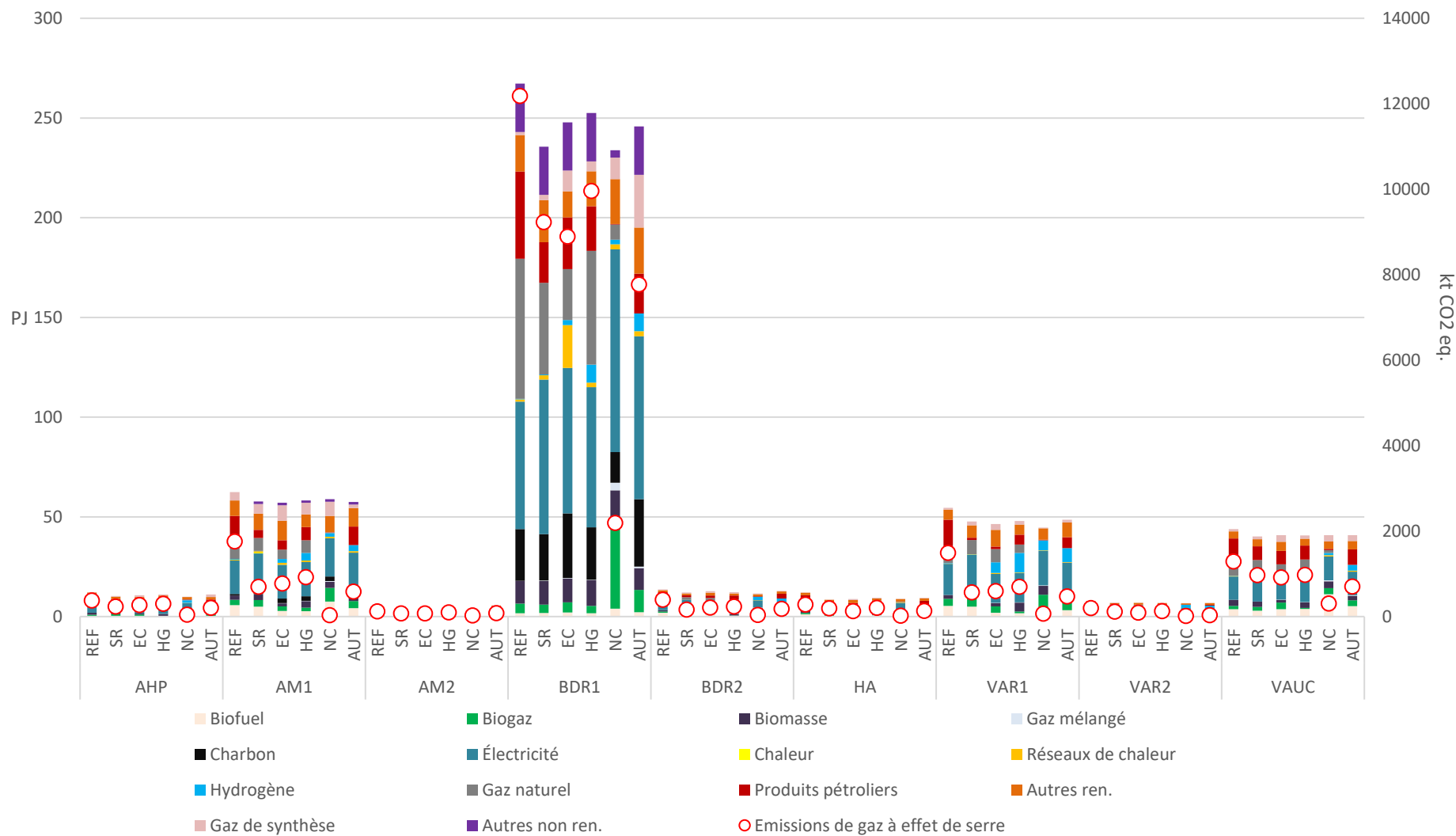
Annexe 3 : Potentiel géothermique mobilisable (extrait de (BRGM, 2013))



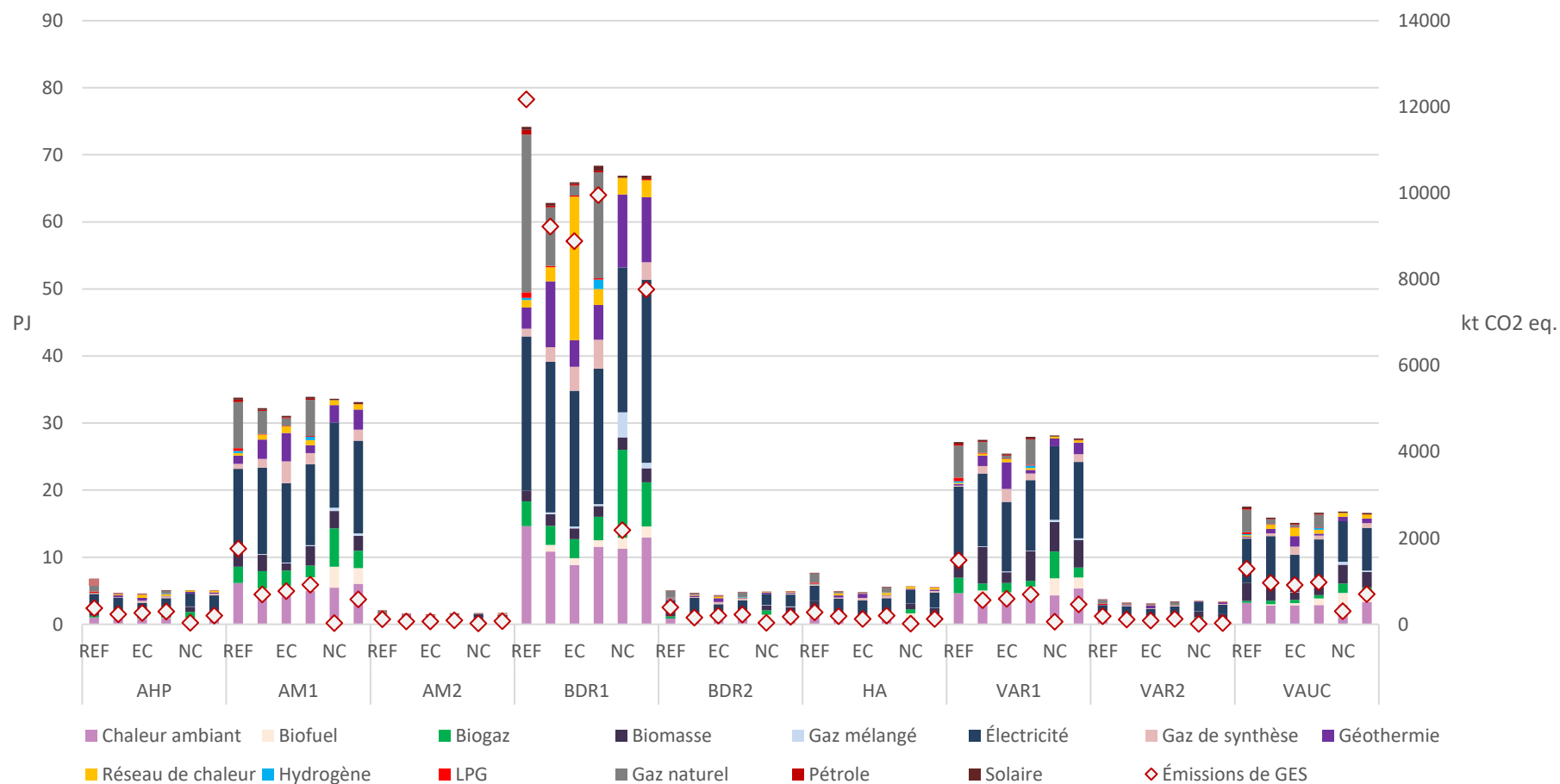
Annexe 4: Liste des principales technologies de production d'électricité disponibles dans le modèle TIMES SUD PACA

	<u>Coût d'investissement (€/kWh)</u>					<u>Efficacité</u>	<u>Facteur d'activité</u>
	<u>2018</u>	<u>2020</u>	<u>2030</u>	<u>2040</u>	<u>2050</u>		
						-	-
Eolien terrestre	1 840	1 577	1 524	1 488	1 471	1	0.26
Eolien en mer	4 600	3 411	2 835	2 569	2 539	1	0.40
Solaire au sol	1 320	921	762	691	683	1	0.15
Solaire en toiture	1 600	1 134	957	868	858	1	0.15
Energie hydro kinétique de la mer	7 894	6 692	4 679	3 472	3 431	1	0.40
Centrale à bois (Elc)	2 400	2 082	2 038	1 993	1 970	0.35	0.80
Centrale à bois (CHP)	3 750	3 278	3 234	3 145	3 108	0.31	0.38
Boue	7 450	6 511	6 423	6 290	6 216	0.25	0.38
Hydrolienne	7 894	6 692	4 679	3 472	3 431	1	0.40
Energie thermique des océans	6 872	5 825	4 073	3 022	2 987	1	0.91
Energie des vagues	5 414	4 589	3 209	2 381	2 353	1	0.25
Hydroélectricité	2 650	2 348	2 348	2 348	2 320	1	0.60
Incinérateur de déchets municipaux	2 190	1 900	1 860	1 819	1 798	0.25	0.68
Centrale à gaz-biogaz cycle combiné (ELC)	1 000	886	886	886	886	0.63	0.85
Central à gaz-biogaz cycle combiné (CHP)	1 300	1 152	1 152	1 152	1 152	0.47	0.38
Pile à combustible	5 000	4 430	2 215	2 215	2 215	0.56	0.85
Pile à combustible à carbonate fondu à Gaz- biogaz	6 667	5 906	2 953	2 953	2 953	0.85	0.50

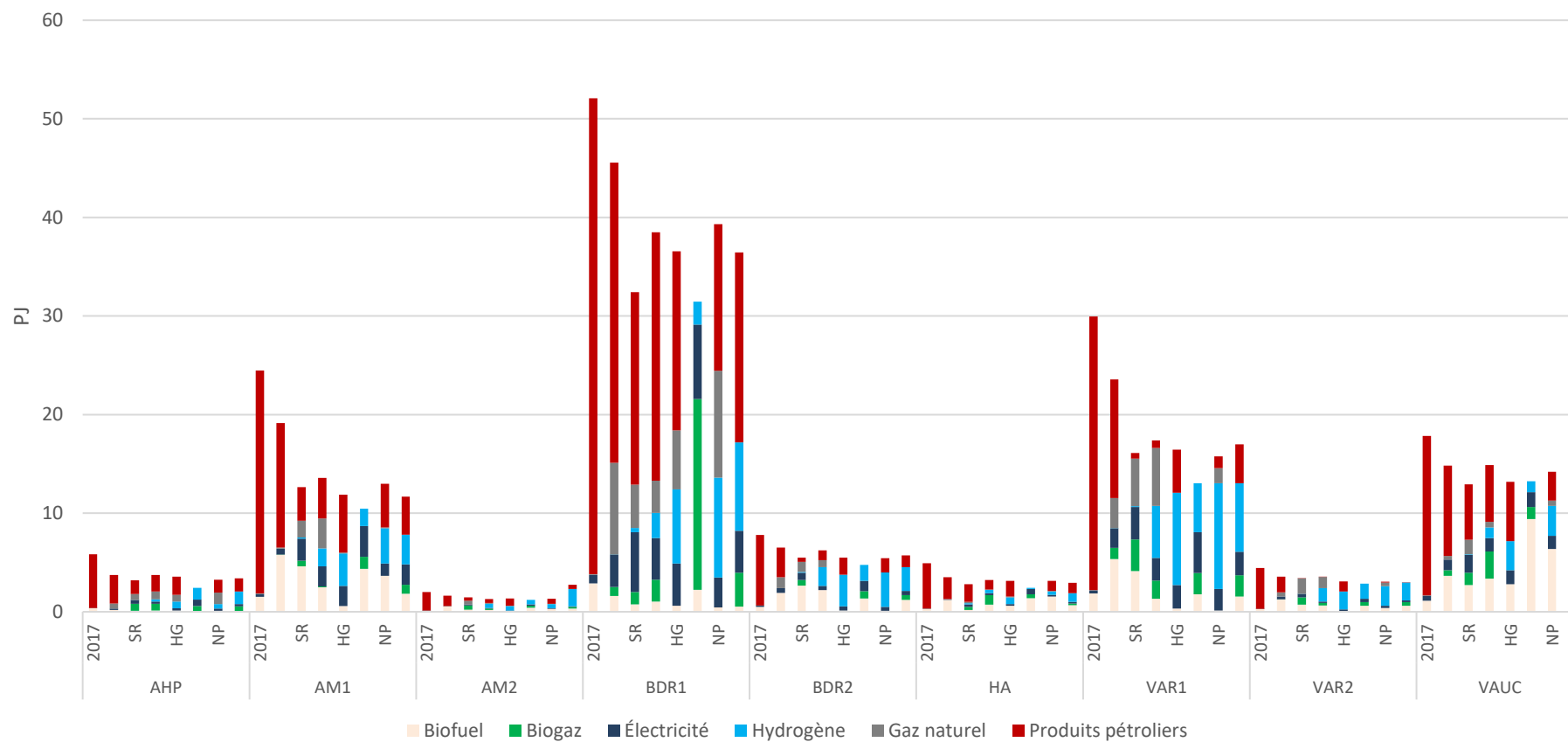
Annexe 5: Consommation d'énergie finale par zone d'étude



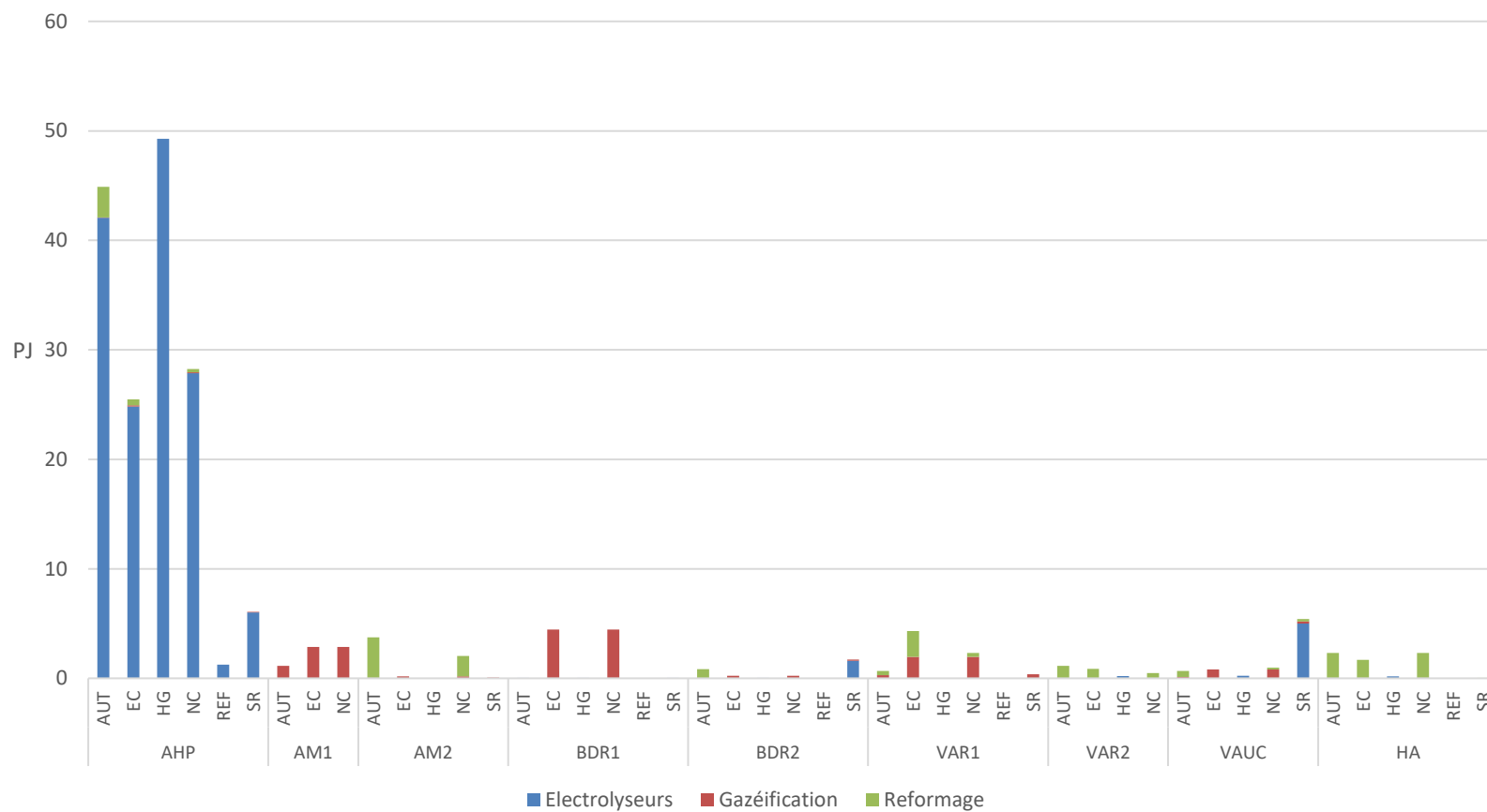
Annexe 6 : Consommation énergétique en 2050 pour le secteur résidentiel-tertiaire par scénario par zone d'étude et par type d'énergie consommé



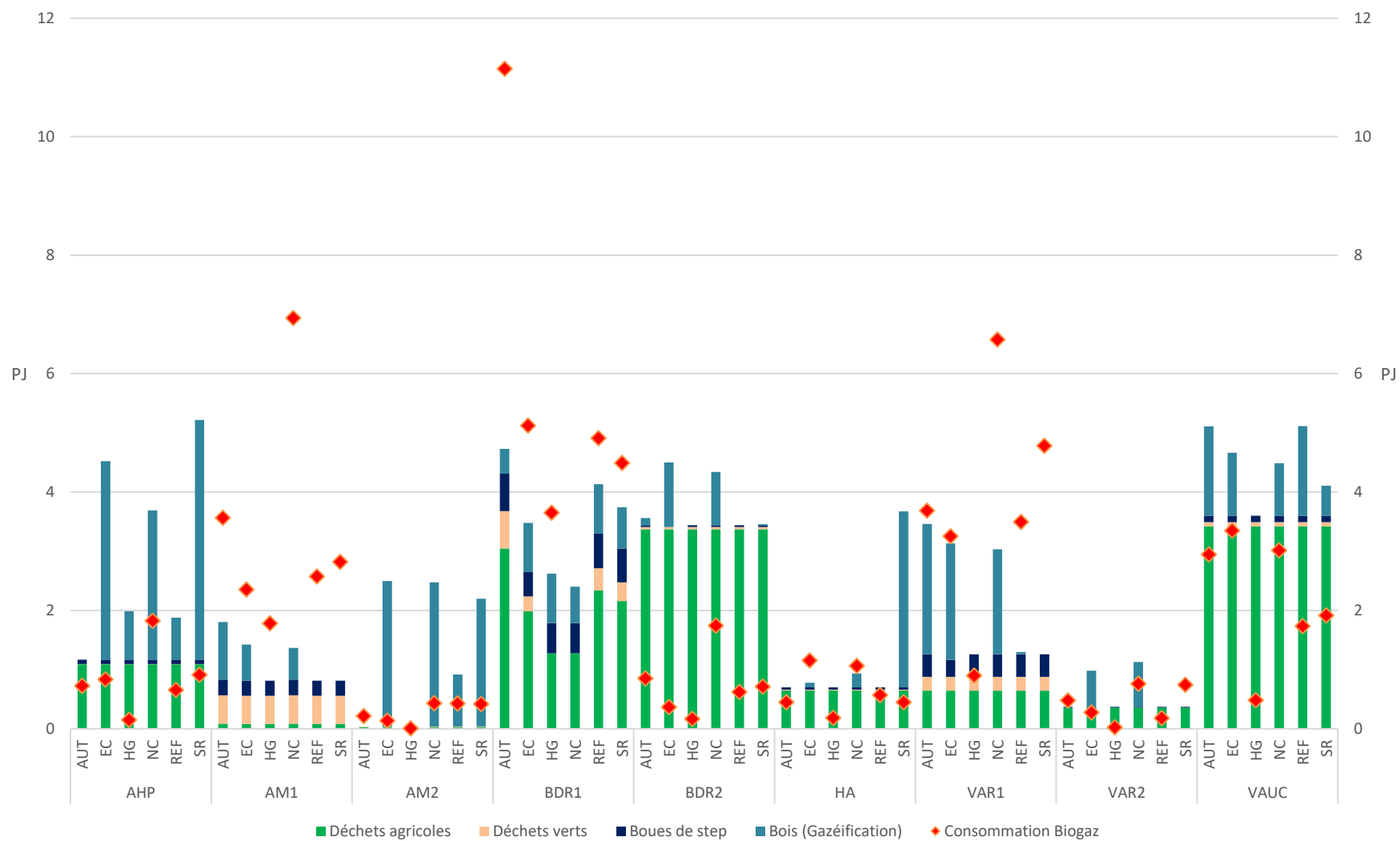
Annexe 7 : Consommation d'énergie finale pour le secteur du transport en 2050 par scénario, par zone d'étude et par type d'énergie consommée



Annexe 8 : Production d'hydrogène en 2050 par zone d'étude et par type de production



Annexe 9: Production vs consommation de biogaz par zone d'étude



BIBLIOGRAPHIE

- Abbasabadi, N., & Ashayeri, J. K. M. (2019). Urban energy use modeling methods and tools : A review and an outlook. *Building and Environment*, 161(July), 106270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106270>
- Able-Thomas, U. (1996). Models of renewable energy technology transfer to developing countries. *Renewable Energy*, 9(1-4), 1104-1107. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88471-0](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88471-0)
- ADEME. (2014). Economie Circulaire : Notions. *Ademe*, 1-10. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-economie-circulaire-oct-2014.pdf>
- ADEME. (2015). *Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations*. <http://www.ademe.fr/node/122931>
- ADEME. (2018). *Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050? Etude de faisabilité technico-économique*. 22. <http://www.ademe.fr/synthese-etude>
- ADEME. (2020). *Le captage et stockage géologique de CO2(CSC) en France :un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles*.
- ADEME, A. de l'Environnement et de la M. de l'Énergie. (2017). *La chaleur fatale*.
- ADEME, & Armines PERSEE. (2015). Un mix électrique 100% renouvelable? Analyses et optimisations Simulation de la production renouvelable et évaluation des gisements Le cas des filières éoliennes terrestre et en mer, PV au sol, PV sur toitures et solaire thermodynamique. *Ademe*, 1-51. www.ademe.fr
- ADEME, IN NUMERI, Carpenè, L., & Haeusler, L. (2019). *Les réseaux de chaleur et de froid, état des lieux de la filière -Marchés, emplois, coûts*. 1-89.
- Afriat, C. (n.d.). *La Prospective*. Retrieved July 4, 2021, from https://www.societefrancaisedeprospective.fr/la-prospective-humaniste/#_ftnref1
- African Circular Economy Alliance. (2021). *Five Big Bets for the Circular Economy in Africa* (Issue April).
- Agnew, M., Schrattenholzer, L., & Voss, A. (1979). A Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts. *IIASA Working Paper*. <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html>
- Akisawa, A., Kang, Y. T., Shimazaki, Y., & Kashiwagi, T. (1999). Environmentally friendly energy system models using material circulation and energy cascade - The optimization work. *Energy*, 24(7), 561-578. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00023-7)
- Alam, M. S., Huq, A. M. Z., & Bala, B. K. (1990). An integrated rural energy model for a village in Bangladesh. *Energy*, 15(2), 131-139. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(90\)90050-C](https://doi.org/10.1016/0360-5442(90)90050-C)
- Alessandro, S. D., Luzzati, T., & Morroni, M. (2010). Energy transition towards economic and environmental sustainability : feasible paths and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.015>
- Anastasiades, K., Blom, J., Buyle, M., & Audenaert, A. (2020). Translating the circular economy to bridge construction : Lessons learnt from a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117(October 2019), 109522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular

- economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133–140. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6>
- Anderson, D. (1972). Models for Determining Least-Cost Investments in Electricity Supply. *Bell Journal of Economics*, 3(1), 267–299. <https://www.jstor.org/stable/pdf/3003078.pdf>
- Andriosopoulos, K., & Silvestre, S. (2017). French energy policy: A gradual transition. *Energy Policy*, 106(March), 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.015>
- Antea Group. (2011). *Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissement de la région Provence-Alpes- Côte d'Azur*.
- Araújo, K. (2014). The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. *Energy Research and Social Science*, 1, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.002>
- Araújo, K. M. (2013). *Energy at the Frontier : Low Carbon Energy System Transitions and Innovation in Four Prime Mover Countries by*.
- Arent, D., Arndt, C., Miller, M., Tarp, F., & Zinaman, O. (2017). *The Political Economy Of Clean Energy Transitions*. 111(479), 1009–1010. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Arnette, A., & Zobel, C. W. (2012). An optimization model for regional renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4606–4615. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.014>
- Arsenault, E., Bernard, J. T., Carr, C. W., & Genest-Laplante, E. (1995). A total energy demand model of Québec. Forecasting properties. *Energy Economics*, 17(2), 163–171. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(94\)00003-Y](https://doi.org/10.1016/0140-9883(94)00003-Y)
- Assoumou, E. (2006). *Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français*.
- AtmoSud. (2017). *Sur la route*. <https://www.atmosud.org/article/sur-la-route>
- Authier, M.-A. (2016). *L'économie circulaire dans le monde : en Chine, une réponse pragmatique*. <https://www.institutmontaigne.org/blog/2016/12/13/L'économie-circulaire-dans-le-monde-%3A-en-Chine%2C-une-réponse-pragmatique>
- AXENNE. (2009). *Etude du potentiel de production d'électricité d'origine solaire en Provence-Alpes-Cote d'Azur*.
- Baas, L. (2008). *Cleaner Production and Industrial Ecology : A Dire Need for 21st Century Manufacturing*.
- Baines, T. S., Lightfoot, H., & Benedettini, O. (2009). *The servitization of manufacturing : A review of literature and reflection on future challenges The servitization of manufacturing : A systematic literature review of interdependent trends 1 Introduction*. June. <https://doi.org/10.1108/17410380910960984>
- Bala, B. K. (1997). Computer modelling of the rural energy system and of CO2emissions for Bangladesh. *Energy*, 22(10), 999–1003. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00025-X)
- Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2011). Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3480–3500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.003>
- BELLOT, C. (2013). *Les collectivités territoriales : mobiliser les sources d'énergies locales. Rapport d'information au nom de la délégation aux collectivités territoriales et à la décentralisation. 1*, 1–71.
- Beltran, A., Bouneau, C., Bouvier, Y., Varaschin, D., & Williot, J.-P. (2020). *État et énergie XIXe-XXe siècle*.

- Benyus, J. (1997). *Biomimicry*. <https://biomimicry.org/janine-benyus/>
- Benyus, J. (2002). Biomimicry. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Berger, G. (1960). *Méthode et résultats*. 1–2.
- Berger, G. (1964). *Phénoménologie du temps et prospective*. Presses univ. de France.
- Berkel, R. Van, & Willems, E. (1997). *The Relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology*. 1(1).
- Berry, G. D., & Lamont, A. D. (2001). *Carbonless Transportation and Energy Storage in Future Energy Systems*.
- Bersano, A., Segantin, S., Falcone, N., Panella, B., & Testoni, R. (2020). Evaluation of a potential reintroduction of nuclear energy in Italy to accelerate the energy transition. *Electricity Journal*, 33(7), 106813. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106813>
- Berthonnet, A. (1999). *La tarification du transport de l' énergie électrique en France avant la Nationalisation . Etude historique et économique*.
- Bertrand, F., & Richard, E. (2016). *Analyse de la construction des politiques régionales face aux changements climatiques*.
- Bessiere, F. (1969). Methods of choosing equipment at Electricite de France: Development and present-day concept. *European Economic Review*, 1(2), 199–211. [https://doi.org/10.1016/0014-2921\(69\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0014-2921(69)90001-4)
- Bhattacharyya, S. C. (2010). *A review of energy system models*. <https://doi.org/10.1108/17506221011092742>
- Bien Estimer. (2018). *La taille des logements en France*. <https://bien-estimer-safti.fr/actualites/panorama-immobilier/la-taille-des-logements-en-france>
- Bigo, A. (2020). *Les transports face au défi de la transition énergétique . Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement*. Institut Polytechnique de Paris, 2020. Français. NNT : 2020IPPAX068 . tel-03082127.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 603–614. <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., & Cullen, J. M. (2017). *Taking the Circularity to the Next Level A Special Issue on the Circular Economy*. 21(3). <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>
- Bocken, N. M. P., Ritala, P., & Huotari, P. (2017). The Circular Economy: Exploring the Introduction of the Concept Among S&P 500 Firms. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 487–490. <https://doi.org/10.1111/jiec.12605>
- Bolat, P., & Thiel, C. (2014a). Hydrogen supply chain architecture for bottom-up energy systems models. Part 1: Developing pathways. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 8881–8897. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.176>
- Bolat, P., & Thiel, C. (2014b). Hydrogen supply chain architecture for bottom-up energy systems models. Part 2: Techno-economic inputs for hydrogen production pathways. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 8898–8925. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.170>
- Bolwig, S., Bazbauers, G., Klitkou, A., & Lund, P. (2018). Modelling energy transitions pathways. *International Sustainability Transitions 2018, June*, 2–12. https://www.researchgate.net/publication/327755499_Modelling_energy_transitions_pathways

- Bonchamp, L. (2020). *Révolution industrielle en France et dans le monde (XIXe)*. <https://www.histoire-pour-tous.fr/dossiers/5662-revolution-industrielle-en-france-et-dans-le-monde-xixe.html>
- Bonciu, F. (2014). The European economy: From a linear to a circular economy. *Romanian Journal of European Affairs*, 14(4), 78–91.
- Bonduelle, A. (2006). *La surcapacité nucléaire*. 59, 1–14.
- Bonsu, N. O. (2020). Towards a circular and low-carbon economy: Insights from the transitioning to electric vehicles and net zero economy. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120659>
- Borbely, A., & Kreider, J. F. (2001). *Distributed Generation The Power Paradigm for the New Millennium*.
- Börjesson, M., & Ahlgren, E. O. (2012). Cost-effective biogas utilisation - A modelling assessment of gas infrastructural options in a regional energy system. *Energy*, 48(1), 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.058>
- Bouckaert, S. (2014). *Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme*.
- Boudes, P. (2011). United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm 1972. *The Green Series : Toward a Sustainable Environment, January 2011*, 410–413. <https://doi.org/10.4135/9781412974615.n109>
- Boulding, K. E. (1966). The Economics of Spaceship Earth. *Ariadne's Thread*, 65–97. https://doi.org/10.1007/978-1-349-20077-1_3
- Bourdin, S., & Maillfert, M. (2020). *Introduction – L'économie circulaire : modes de gouvernance et. 28*.
- Boutaud, B. (2017). *Un modèle énergétique en transition ? Centralisme et décentralisation dans la régulation du système électrique. Université Paris-Est, 2016. Français. NNT : 2016PESC1173 . tel-01524555*.
- Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13–14), 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>
- Brennan, G., & Tennant, M. (2013). *Business and production solutions Closing loops and the circular economy. 2050*.
- BRGM. (2013). *Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. 41(4), 919–926. <https://doi.org/10.3406/ridc.1989.1865>
- Brundtland, G. H. (1987). *Rapport Brundtland - Notre avenir à tous*. 349.
- Buessler, S. (2020). *Transition énergétique vers la durabilité : Implications territoriales de trois modèles de transition énergétique et analyse du modèle français appliquée au secteur résidentiel existant To cite this version : HAL Id : tel-02864589 Transition énergétique v*.
- C2ES, C. for C. and E. S. (2019). OUTCOMES OF THE U.N. CLIMATE CHANGE CONFERENCE IN MADRID. *Change, December*, 1–4.
- Cairns, S., Ogden, M., & Mcfatridge, S. (2018). *GETTING TO A CIRCULAR ECONOMY : A PRIMER FOR Policy Brief | Circular Economy (Issue January)*.
- Capros, P., Mantzos, L., Petrellis, D., Panos, V., & Delkis, K. (1999). *Energy in Europe: European Union energy outlook to 2020. Brussels: European Commission*.
- Caramanis, M., & Haurie, A. (2017). *ETEM-SG : Optimizing Regional Smart Energy System with Power Distribution Constraints and Options*. 411–430. <https://doi.org/10.1007/s10666->

016-9544-0

- Carbone 4. (2014). *Etude des 4 trajectoires du DNTE*.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*.
- Caumel, C., & Maïzi, N. (2020). *COVID-19 lockdown measures as a lifestyle metric for triggering the French energy transition : a long-term energy prospective exercise*.
- CCI VAR. (2019). *Mutualisation des infrastructures pour les mobilités terrestre et maritime : projet HYNOVAR*.
- CERC PACA. (2020). *Bilan annuel de la Rénovation Energétique - Bilan 2019 et perspective 2020*.
- CEREMA. (2015). *Mise à jour 2015 du potentiel hydroélectrique en région PACA*.
- CEREMA. (2016). *Eclairage public en Région Provence Alpes Cote D'Azur. Cartographie et évaluation des enjeux à l'échelle régionale*.
- Cerema Méditerranée. (2016). *Évaluation macroscopique du potentiel photovoltaïque mobilisable au sol dans le sud de la France*.
- Cerema Méditerranée. (2019). *Évaluation macroscopique du potentiel photovoltaïque mobilisable au sol en région Provence-Alpes-Cote d'Azur*.
- Chanard, C. (2016). *Territoire et énergie : politiques locales, échelles d'intervention et instruments de mobilisation, de connaissance et d'action*.
- Charpentier, J.-P. (1974). *A REVIEW OF ENERGY MODELS No. 1. 1*.
- Charpentier, J.-P. (1975). *A REVIEW OF ENERGY MODELS: No. 2. 2*.
- Charpentier, J.-P., & J.-M. Beaujean. (1976). *A review of energy models No. 3*.
- Chasseriaux, J. (1983). « *La politique énergétique française* ». 23, 268–276.
- Chen, B., Xiong, R., Li, H., Sun, Q., & Yang, J. (2019). Pathways for sustainable energy transition. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1564–1571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.372>
- Chen, S., Liu, P., & Li, Z. (2020). Low carbon transition pathway of power sector with high penetration of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130(May), 109985. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109985>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial Symbiosis : Literature and Taxonomy. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 25, 313–337.
- Chiappetta Jabbour, C. J., Sarkis, J., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Scott Renwick, D. W., Singh, S. K., Grebinevych, O., Kruglianskas, I., & Filho, M. G. (2019). Who is in charge? A review and a research agenda on the 'human side' of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 222, 793–801. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.038>
- Chicco, G., & Mancarella, P. (2009). *Distributed multi-generation : A comprehensive view*. 13, 535–551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.014>
- Circular Colab. (2018). *THE STATE OF THE CIRCULAR ECONOMY IN AMERICA*.
- Citepa. (2020). *Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France OMINEA - 17 ème édition. Inventory methodology report of GHG and air pollutant emissions in France - 17th edition (in French)*. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Ominea_ed2020.pdf<https://www.citepa.org/fr/omine/>
- CITEPA. (2019). *De la COP-24 à la COP-25 : Adoption des règles de mise en œuvre de l'Accord de Paris, Sommet Action Climat 2019 et enjeux de la COP-25*. 1–87.
- Club of Rome. (n.d.). Retrieved July 5, 2021, from <https://www.clubofrome.org/about-us/>

- Comité des Constructeurs Français d'Automobiles. (2017). *L'Industrie Automobile Française*. https://ccfa.fr/wp-content/uploads/2018/01/Analyse_Statistiques_2017_FR.pdf
- Commissariat Général au développement Durable. (2018a). *Prix de l'électricité en France et dans l'Union européenne en 2017*.
- Commissariat Général au développement Durable. (2018b). *Prix du gaz naturelle en France et dans l'Union européenne en 2017*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/recherche?text=Prix+du+gaz+naturel+en+France+et+dans+l'Union+européenne>
- Commissariat Général au développement Durable. (2020a). *Les prix des produits pétroliers ont connu des fluctuations modérées en 2019*.
- Commissariat Général au développement Durable. (2020b). *Prix de l'électricité en France et dans l'Union européenne en 2019*.
- Commissariat Général au Développement Durable. (2014). Comparaison internationale des politiques publiques en matière d'économie circulaire. *Études Et Documents*, 101, 57. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Comparaison-internationale-des.html>
- Commission Européenne. (2019). *Boucler la boucle : la Commission met en œuvre le plan d'action en faveur de l'économie circulaire*. https://ec.europa.eu/france/news/20190304/plan_action_economie_circulaire_fr
- Compte CO2. (n.d.). *Environnement : qu'est-ce-que l'économie bleue ?* Retrieved July 12, 2021, from <https://www.compteco2.com/article/comment-marche-l-economie-bleue/>
- Connaissances des énergies. (2011). *Choc pétrolier: définition, explications, conséquences des chocs pétroliers*. <https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/choc-petrolier>
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059–1082. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- Connolly, T. J., Dantzig, G. B., & Parikh, S. C. (1977). *The Stanford PILOT Energy/Economic Model*.
- Contreras, A., Carpio, J., Molero, M., & Veziroglu, T. N. (1999). Solar-hydrogen: An energy system for sustainable development in Spain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(11), 1041–1052. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00134-7)
- Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A., Trovato, M., Bari, P., & Orabona, V. E. (2003). *A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints*. 7, 99–130. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(03\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00004-2)
- Costa, I., Massard, G., & Agarwal, A. (2010). *Waste management policies for industrial symbiosis development : case studies in European countries*. 18, 815–822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.019>
- Creti, A., Pouyet, J., & Eugenia, M. (2011). *The NOME Law : Some Implications for the French Electricity Market* □. 1–18.
- D'Amato, D., Korhonen, J., Leskinen, P., Matthies, B. D., & Toppinen, A. (2017). *Green , circular , bio economy : A comparative analysis of sustainability avenues*. 168, 716–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Dahan, A. (2009). Entre Poznan et Copenhague: Le régime climatique au milieu du gué. *Natures Sciences Societes*, 17(3), 271–282. <https://doi.org/10.1051/nss/2009043>
- Daianova, L., Dotzauer, E., Thorin, E., & Yan, J. (2012). Evaluation of a regional bioenergy system with local production of biofuel for transportation , integrated with a CHP plant. *Applied Energy*, 92, 739–749. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.016>

- Dambrine, F. (2000). *Le schéma de services collectifs de l'énergie Dans le cadre d'une nouvelle.* 29–33.
- Dantzig, G. B., & et al. (1978). *Stanford PILOT energy/economic model. EPRI EA-626 Interim Report. Palo AHO.*
- de Brabandère, L., & Mikolajczak, A. (2008). Il sera une fois... la prospective stratégique. *L'Expansion Management Review*, N° 128(1), 32. <https://doi.org/10.3917/emr.128.0032>
- De Miglio, R., Gargiulo, M., Gelmini, A., & Lanati, F. (2012). The multiregional energy system model: MONET—a comprehensive tool for energy-environmental analysis at both regional and national level in Italy. *12th IAEE European Energy Conference, Venice, Italy*, 1–2.
- DEFRA, D. of E. F. and R. A. (2020). *Annex I Summary of 2020 CEP measures and proposed approaches to transposition.*
- Degremont, M. (2018). *transition énergétique Transitions énergétiques et politiques à l'orée du XXI e siècle L'émergence en France d'un modèle territorial de transition.*
- Desmond, P., & Asamba, M. (2019). *Accelerating the transition to a circular economy in Africa. April.* <https://doi.org/10.4324/9780429434006-9>
- Di Leo, S., Pietrapertosa, F., Loperte, S., Salvia, M., & Cosmi, C. (2015). Energy systems modelling to support key strategic decisions in energy and climate change at regional scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 394–414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.031>
- Didelot, A., Maïzi, N., Mazaauric, V., Assoumou, E., & Selosse, S. (2017). Balancing Energy Efficiency and Fossil Fuel: The Role of Carbon Pricing. *Energy Procedia*, 105, 3545–3550. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.814>
- Dollé, M. (1978). Forces et faiblesses des Etats-Unis. *Politique Étrangère*, 54(1), 45–55. <https://doi.org/10.3406/polit.1989.3836>
- Doudard, R. (2019). *Flexibilité et interactions de long terme dans les systèmes multi-énergies : analyse technico-économique des nouvelles filières gazières et électriques en France HAL Id : tel-02352009 de l' Université de recherche Paris Sciences et et.*
- DREAL PACA. (2020). *Potentiel de développement sur toitures - DREAL Provence Alpes-Côte d'Azur.* <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/potentiel-de-developpement-sur-toitures-a12535.html>
- Dreyfus, M., & Allemand, R. (2018). Three years after the French energy transition for green growth law: Has the “energy transition” actually started at the local level? *Journal of Environmental Law*, 30(1), 109–133. <https://doi.org/10.1093/jel/eqx031>
- Drouineau, M. (2012). *Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique To cite this version : HAL Id : pastel-00731894 THÈSE l' École nationale supérieure des mines de Paris Modélisation prospective et analyse spatio-tem.*
- Durand-lasserve, O., Pierru, A., & Smeers, Y. (2010). Uncertain long-run emissions targets , CO 2 price and global energy transition : A general equilibrium approach. *Energy Policy*, 38(9), 5108–5122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.041>
- Duruissseau, K. (2016). *Transition énergétique et géographie : le photovoltaïque au sol dans le sud de la France.*
- E. G. Cazalet. (1974). *“SRI modeling capability,” Stanford Research Institute, May.*
- Écologique Ministère de la Transition. (2020). *Scénarios prospectifs énergie-climat-air.* <https://www.ecologie.gouv.fr/scenarios-prospectifs-energie-climat-air>
- Ekins, P., Domenech, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N., & Lotti, L. (2019). The

- Circular Economy: What, Why, How and Where. *Background Paper for an OECD/EC Workshop on 5 July 2019 within the Workshop Series "Managing Environmental and Energy Transitions for Regions and Cities" Paris*, 1–89.
<https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/Ekins-2019-Circular-Economy-What-Why-How-Where.pdf>
- Elhadidy, M. A. (2002). *Performance evaluation of hybrid (wind / solar / diesel) power systems*. 26, 401–413.
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods : A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741–2751.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013a). *Towards the circular economy : Economic and business rationale for an accelerated transition*. 62(4), 247–252.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013b). *Towards the circular economy: Opportunities for the consumer goods sector: Vol. a*.
- Emelianoff, C. (2005). Les agendas 21 locaux : quels apports sous quelles latitudes ? *Développement Durable et Territoires, Dossier 4*, 0–17.
<https://doi.org/10.4000/developpementdurable.532>
- EMF, E. M. F. (2019). *Completing the picture how the circular economy tackles the climate change*. September, 1–62.
- ENEA Consulting. (2017). *État des lieux du biométhane en France*.
- Energie Demain. (2011). *Potentiel d'économies d'énergie des bâtiments de la région PACA*. 1–202.
- Energy Modeling Forum. (1977). *Energy and economy*.
- Energy Research and Development Administration DC., W. (1977). *A National Plan for Energy Research, Development and Demonstration*.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eric&AN=ED165983&site=ehost-live&scope=site>
- Environment and Climate Change Canada. (2021). *Circular North America : Accelerating the Transition to a Thriving and Resilient Low-carbon Economy* (Issue May).
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1–2), 1–10. [https://doi.org/10.1016/s0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/s0959-6526(97)00003-6)
- Erkman, S. (2001). Industrial ecology: A new perspective on the future of the industrial system. *Swiss Medical Weekly*, 131(37–38), 531–538. <https://doi.org/2001/37/smw-09845>
- Erkman, Suren. (2004). *Vers une écologie industrielle*.
- Esmaeilian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C., & Behdad, S. (2018). The future of waste management in smart and sustainable cities : A review and concept paper. *Waste Management*, 81, 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.047>
- European Commission. (2015). *Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire*.
- European Commission. (2016). EU Reference Scenario 2016. In *EU Reference Scenario 2016*.
<https://doi.org/10.2833/9127>
- European Commission. (2015). Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. In *COM(2015) 614 final COMMUNICATION*. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(67\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0022-4073(67)90036-2)
- European Union. (2008). *DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. 3–30.

- Ezzat, A. M. (2016). Sustainable Development of Seaport Cities Through Circular Economy: a Comparative Study With Implications To Suez Canal Corridor Project. *European Journal of Sustainable Development*, 5(4), 509–522. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2016.v5n4p509>
- Faberon, J.-Y. (1982). *Les projets de réforme de l'administration de l'énergie*. 205(205), 13–16. <https://www.jstor.org/stable/40768977>
- Faberon, J. (1997). La loi du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (première partie). In: *Revue Juridique de l'Environnement*, 2, 133–155.
- Fabrizio, E., Corrado, V., & Filippi, M. (2010). A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy*, 35(3), 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.012>
- Fallah, N., Fitzpatrick, C., Killian, S., & Johnson, M. (2021). End-of-Life Electric Vehicle Battery Stock Estimation in Ireland through Integrated Energy and Circular Economy Modelling. *Resources, Conservation and Recycling*, 174(December 2020), 105753. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105753>
- Fan, Y. Van, Lee, C. T., Lim, J. S., Klemeš, J. J., & Le, P. T. K. (2019). Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1482–1491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.266>
- Fattahi, A., Sijm, J., & Faaij, A. (2020). A systemic approach to analyze integrated energy system modeling tools : A review of national models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133(July), 110195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110195>
- Federal Energy Administration. (1974). *Project Independence Report, U.S. Government Printing Pffice, Washington, D.C.*
- Fernandez, A. (1999). *Les lumières de la ville . L'administration municipale à l'épreuve de l'électrification*. 107–122.
- Finon, D. (1974). *Optimisation model for the French energy sector*. June, 136–151.
- Fletcher, S. R. (2003). *CRS Report for Congress - Global Climate Change : The Kyoto Protocol*.
- Freppaz, D., Minciardi, R., Robba, M., & Rovatti, M. (2004). *Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level*. 26, 15–25. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00079-5)
- Futuribles. (n.d.). *Futuribles - Veille, prospective, stratégie*. Retrieved July 4, 2021, from <https://www.futuribles.com/fr/qui-sommes-nous/comprendre-la-prospective/histoire/>
- Gaigalis, V., Markevicius, A., Katinas, V., Skema, R., & Tumosa, A. (2013). Analysis of energy transition possibilities after the decommission of a nuclear power plant in Ignalina region in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.028>
- Gebreegziabher, Z., Mekonnen, A., Kassie, M., & Köhlin, G. (2012). Urban energy transition and technology adoption : The case of Tigray, northern Ethiopia. *Energy Economics*, 34(2), 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.07.017>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gençer, E., Torkamani, S., Miller, I., Wenzhao, T., Sullivan, F. O., & West, S. (2020). Sustainable energy system analysis modeling environment : Analyzing life cycle emissions of the energy transition. *Applied Energy*, 277(July), 115550. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115550>
- Gendron, C. (2014). Beyond environmental and ecological economics: Proposal for an economic

- sociology of the environment. *Ecological Economics*, 105, 240–253.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.06.012>
- Geng, Y., Sarkis, J., & Ulgiati, S. (2013). *Measuring China's Circular Economy. February 2016*, 3–5.
<https://doi.org/10.2307/41942068>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Goldemberg, J. et al. (1987). Energy for a Sustainable World. In *Scenario*.
<https://doi.org/10.1002/anie.201102819>
- Gonzales Chavez, S., Xiberta Bernat, J., & Llaneza Coalla, H. (1999). Forecasting of energy production and consumption in Asturias (northern Spain). *Energy*, 24(3), 183–198.
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00099-1)
- Government-of-the-Netherlands. (2016). *A Circular Economy in the Netherlands by 2050*.
- GRDF. (2019). *Panorama du gaz renouvelable en 2019*.
- Griffin, P., Hammond, G., & Norman, J. (2013). Industrial Energy Use from a Bottom-Up Perspective: Developing the Usable Energy Database (Beta version). *UK Energy Research Centre (UKERC/WP/ED/2013/002)*.
- Groscurth, H. M., Bruckner, T., & Kümmel, R. (1993). Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems. *Energy*, 18(12), 1187–1205.
[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90009-3](https://doi.org/10.1016/0360-5442(93)90009-3)
- GRTgaz. (2017). *Procédure de gestion des réservations de capacité d'injection de biométhane sur les réseaux de transport et de distribution de gaz naturel*. 1–18.
- GRTgaz. (2019). Conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel. *Présence Africaine*, 46. <https://doi.org/10.3917/presa.181.0441>
- Guidolin, M., & Guseo, R. (2016). The German energy transition : Modeling competition and substitution between nuclear power and Renewable Energy Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1498–1504. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.022>
- Haack, B. N. (1982). Economic analysis of small wind-energy conversion systems. *Applied Energy*, 11(1), 51–60. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(82\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0306-2619(82)90047-2)
- Habbane, A. Y., McVeigh, J. C., & Cabawe, S. O. I. (1986). Solar radiation model for hot dry arid climates. *Applied Energy*, 23(4), 269–279. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(86\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0306-2619(86)90011-5)
- Häfele, W. (1981). *Energy in a finite world*.
- Hafner, S., Anger-kraavi, A., Monasterolo, I., & Jones, A. (2020). Emergence of New Economics Energy Transition Models : A Review. *Ecological Economics*, 177(June), 106779.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106779>
- Hardie, R. W., Black, W. E., & Little, W. W. (1972). "ALPS, A Linear Programming System for Forecasting Optimum Power Growth Patterns," *Hanford Engineering Development Laboratory, Richland, Wash.*
- Haupt, M., Vadenbo, C., & Hellweg, S. (2017). Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 615–627. <https://doi.org/10.1111/jiec.12506>
- Haut Conseil Pour le Climat. (2020). *Etude qualitative sur la prise en compte des politiques climat par les Régions*. 1–70.
- Hecher, M., Vilsmaier, U., Akhavan, R., & Binder, C. R. (2016). An integrative analysis of energy

- transitions in energy regions: A case study of ökoEnergieLand in Austria. *Ecological Economics*, 121, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.11.015>
- Hélianthe. (2015). *Evaluation du potentiel énergétique des sources de méthanisation de Provence-Alpes-Côte d'Azur*.
- Henning, D. (1997). MODEST-An Energy-System Optimisation Model Applicable to local utilities and countries. *Energy*, 22(12), 1135–1150.
- Heshmati, A. (2015). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3/4), 251. <https://doi.org/10.1504/ijge.2017.10010876>
- Hiremath, R. B., Shikha, S., & Ravindranath, N. H. (2007). *Decentralized energy planning ; modeling and application — a review*. 11, 729–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.005>
- Hobson, K. (2019). *Closing the loop or squaring the circle ? Locating generative spaces for the circular economy. January 2015*. <https://doi.org/10.1177/0309132514566342>
- Hoffman, K. C. (1976). *ENERGY SYSTEM MODELING AND FORECASTING*.
- Holmgren, D. (2002). *Permaculture : Principles & pathways beyond sustainability*.
- Homrich, A. S., Galvão, G., Abadia, L. G., & Carvalho, M. M. (2018). The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production*, 175, 525–543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064>
- Hossain, M. (2020). *International Journal of Hospitality Management Sharing economy : A comprehensive literature review*. 87(February). <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2020.102470>
- Hulscher, W. S. (1980). *Energy for sustainable rural development*. 527–532.
- HURIET, C. (1999). *Rapport au Sénat sur la proposition de loi relative au service minimum en cas de grève dans les services et entreprises publics, N°194, Paris: Sénat*. 253. <https://www.senat.fr/rap/l98-194/l98-1943.html>
- Hutton, P. (2021). *The Shift from Sustainable to Regenerative Design*. <https://sustainablebrands.com/read/product-service-design-innovation/the-shift-from-sustainable-to-regenerative-design>
- Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., Millward-hopkins, J., & Williams, P. T. (2017). Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy : A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 910–938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100>
- IEA. (2020a). *Key World Energy Statistics 2020, IEA, Paris* <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>.
- IEA. (2020b). *Reduce: Energy Efficiency. August*.
- IEA. (2020c). *Reuse: Carbon Reuse. August*.
- IEA. (2020d). *World electricity generation mix by fuel, 1971-2018, IEA, Paris* <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-generation-mix-by-fuel-1971-2018>.
- IEA, I. E. A. (2018). *Towards cross-modal electrification Global EV Outlook 2018*. <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en>
- IES, T. I. of E. S. (2015). *The circular economy in Japan*.
- IFPEN. (2019). *Tableau de bord biocarburants 2019*. <https://www.ifpennergiesnouvelles.fr/article/tableau-bord-biocarburants-2019>

- IIASA. (1982). *Long-term energy supply strategies for stockholm county*. Report by the Energy Group of the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1982. [http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/12994/1/Long-term energy supply.pdf](http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/12994/1/Long-term%20energy%20supply.pdf)
- Inge, R. (2005). *Trends in the development of ecological economics from the late 1980s to the early 2000s*. 55, 262–290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.010>
- Iniyan, S., Suganthi, L., Jagadeesan, T. R., & Samuel, A. A. (2000). Reliability based socio economic optimal renewable energy model for India. *Renewable Energy*, 19(1–2), 291–297. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00043-9)
- Insee. (2021). *Produit intérieur brut en 2018*. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012723#tableau-TCR_062_tab1_regions2016
- INSEE. (2017). *Projections de population 2013-2050 pour les départements et les régions*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2859843>
- INSEE. (2018). *Produits intérieurs bruts régionaux et valeurs ajoutées régionales de 1990 à 2015*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1893220>
- INSEE. (2019). *Entre 29 000 et 35 000 résidences principales à produire chaque année d'ici 2030*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4185973>
- INSEE. (2021). *Équipement automobile des ménages en 2018. Comparaisons régionales et départementales*.
- International Energy Agency. (2017). France 2016 Review. *Energy Policies of IEA Countries*, 207.
- IRENA. (2020a). *Green Hydrogen. A guide to policy making*.
- IRENA. (2020b). *Recycle: Bioenergy. August*.
- Izard, C. (Reseau A. C. F. (2016). *Nouvelles compétences climat-énergie*. [https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Nouvelles-compétences-climat-énergie-des-collectivités-territoriales-.pdf](https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Nouvelles-comp%C3%A9tences-climat-%C3%A9nergie-des-collectivit%C3%A9s-territoriales-.pdf)
- J.-M. Beaujean, & Charpentier, J.-P. (1978). *A REVIEW OF ENERGY MODELS NO. 4. 4*.
- Jarrige, F., & Vrignon, A. (2020). Généalogie de la puissance, incertitudes et doutes (1750-1860). In *Face à la puissance*. <https://doi.org/10.3917/dec.jarri.2020.01.0023>
- Joshi, B., Bhatti, T. S., Bansal, N. K., Rijal, K., & Grover, P. D. (1991). Decentralized energy planning model for optimum resource allocation with a case study of the domestic sector of rurals in Nepal. *International Journal of Energy Research*, 15(1), 71–78. <https://doi.org/10.1002/er.4440150109>
- Joskow, P. L., & Baughman, M. L. (1976). The Future of the U . S . Nuclear Energy Industry. *Bell J. Econ.*, 7(1), 3–32. <https://www.jstor.org/stable/3003188>
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(February 2017), 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kang, S. (2017). *La place de la bioénergie dans un monde sobre en carbone : Analyse prospective et développement de la filière biomasse dans le modèle TIAM-FR. Ingénierie de l'environnement. PSL Research University, 2017. Français. NNT : 2017PSLEM081 . tel-02096031*.
- Kanniappan, P., & Ramachandran, T. (1998). Optimization model for energy generation from agricultural residue. *International Journal of Energy Research*, 22(13), 1121–1132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19981025\)22:13<1121::AID-ER429>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19981025)22:13<1121::AID-ER429>3.0.CO;2-5)
- KanORS. (n.d.). *VEDA*. Retrieved August 7, 2021, from <https://www.kanors-emr.org/home>
- Kanudia, A, & Loulou, R. (1999). Advanced bottom-up modelling for national and regional energy

- planning in response to climate change. *International Journal of Environment and Pollution*, 12(2-3), 191-216. <https://doi.org/10.1504/IJEP.1999.002292>
- Kanudia, Amit, & Loulou, R. (1998). Robust responses to climate change via stochastic MARKAL: The case of Québec. *European Journal of Operational Research*, 106(1), 15-30. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00356-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00356-7)
- Kanudia, Amit, & Shukla, P. (1998). Modelling of uncertainties and price elastic demands in energy-environment planning for India. *Omega*, 26(3), 409-423. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(97\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00071-6)
- Karppinen, A., Kukkonen, J., Elola, T., Konttinen, M., Koskentalo, T., & Rantakrans, E. (2000). *A modelling system for predicting urban air pollution : model description and applications in the Helsinki metropolitan area*. 34, 3723-3733.
- Kavrakoglu, I. (1987). *Energy models*. 28.
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development*. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.
- Keeny, S. M., & AL., E. (1977). *Nuclear Power Issues and Choices, Report of the Nuclear Energy Policy Study Group (NEPS)*, Ballinger Publishing Co., Cambridge, Mass.
- Kennedy, M. (1974). An Economic Model of the World Oil Market. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol. 5, No. 2, 5(2), 540-577. <http://www.jstor.org/stable/3003120>
- Kimmins, J. P. (1998). *Predicting Sustainability of Forest in the Face of Changing Bioenergy*. 13, 201-212.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(September), 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Knickmeyer, D. (2020). Social factors in influencing household waste separation : A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118605. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118605>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kowszyk, Y., & Maher, R. (2018). *Case studies on Circular Economy models and integration of Sustainable Development Goals in business strategies in the EU and LAC*.
- L'Observatoire Régionale des Transports. (2016). *Chiffres Clés des Transports*. 3-4. <https://www.ort-paca.fr/publications/chiffres-cles/chiffres-cles-2010-2019/>
- La Fabrique Ecologique. (2013). *LES TERRITOIRES AU CŒUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE Pour un modèle français de décentralisation énergétique*. 39.
- La Provence. (2019). *La filière hydrogène prête à décoller en région Sud*. <https://www.laprovence.com/article/papier/5469735/la-filiere-hydrogene-prete-a-decoller-en-region-sud.html>
- Lahti, T., Wincent, J., & Parida, V. (2018). A definition and theoretical review of the circular economy, value creation, and sustainable business models: Where are we now and where should research move in the future? *Sustainability (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082799>
- Lambe, F., Jürisoo, M., Wanjiru, H., & Senyagwa, J. (2015). Bringing clean, safe, affordable cooking

- energy to Kenyan households: an agenda for action. *The New Climate Economy*, 38.
www.newclimateeconomy.report
- Lazarevic, D., & Valve, H. (2017). Narrating expectations for the circular economy : Towards a common and contested European transition. *Energy Research & Social Science*, 31(October 2016), 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.006>
- Le Gallic, T. (2018). *Penser nos futurs modes de vie dans les démarches de prospective énergétique : proposition d'une approche par la modélisation.*
- LE HEN, A. (2019). *HYGREEN PROVENCE Production, stockage massif et valorisation d'H2 vert.*
- Legifrance. (2005). *LOI n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique.* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000813253>
- Legifrance. (2015). *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1).* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385>
- Légifrance. (1999). *LOI no 99-533 du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire et portant modification de la loi no 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire (1).* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000760911/>
- Légifrance. (2015). *LOI n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République.* <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000030985460/>
- Leimbach, M. (2003). Equity and carbon emissions trading: A model analysis. *Energy Policy*, 31(10), 1033–1044. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00180-5)
- Lemille, A. (2019). *To move to a circular economy, we need to stop recycling.* <https://www.weforum.org/agenda/2019/11/build-circular-economy-stop-recycling/>
- Lenormand, A. (2019). *Clarifications sur l'autorité environnementale.* <https://www.banquedesterritoires.fr/loi-energie-climat-inventaire-des-principales-mesures-pour-les-collectivites>
- Levy, J., & Auez, V. (2016). *Les dynamiques de l'économie circulaire en Chine.*
- Lew, D. J. (2000). Alternatives to coal and candles: Wind power in China. *Energy Policy*, 28(4), 271–286. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(99\)00077-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(99)00077-4)
- Lewandowski, M. (2016). Designing the business models for circular economy-towards the conceptual framework. *Sustainability (Switzerland)*, 8(1), 1–28. <https://doi.org/10.3390/su8010043>
- Li, F. G. N., Pye, S., & Strachan, N. (2016). Regional winners and losers in future UK energy system transitions. *Energy Strategy Reviews*, 13–14, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.08.002>
- Liang, Q. M., Fan, Y., & Wei, Y. M. (2007). Multi-regional input-output model for regional energy requirements and CO2emissions in China. *Energy Policy*, 35(3), 1685–1700. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.04.018>
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation : a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Lifset, R., & Graedel, T. E. (2015). Industrial ecology: goals and definitions. *A Handbook of Industrial Ecology.* <https://doi.org/10.4337/9781843765479.00009>
- Linternaute. (2020). *Climat Provence Alpes Cote d'Azur en 2020.* <http://www.linternaute.com/voyage/climat/provence-alpes-cote-d-azur/region-93>
- Liu, Q., Li, H. ming, Zuo, X. li, Zhang, F. fei, & Wang, L. (2009). A survey and analysis on public

- awareness and performance for promoting circular economy in China: A case study from Tianjin. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 265–270.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.003>
- Liu, Z., Adams, M., Cote, R. P., Chen, Q., Wu, R., & Wen, Z. (2018). How does circular economy respond to greenhouse gas emissions reduction : An analysis of Chinese plastic recycling industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(March 2017), 1162–1169.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.038>
- Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtila, A., & Goldstein, G. (2016). Documentation for the TIMES Model Part II. *IEA Energy Technology Systems Analysis Programme, April*, 1–78.
- Lovins, H., Hawken, P., & Lovins, A. B. (1999). *Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution*.
- Maha, S. (2018). “De la COP21 à la COP24 : bilan d’étape.” 32.
- Majone, G. (1997). From the positive to the regulatory state: Causes and consequences of changes in the mode of governance. *Journal of Public Policy*, 17(2), 139–167.
<https://doi.org/10.1017/s0143814x00003524>
- Mancarella, P. (2014). MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 65, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- Manne., A. S. (1981). *Energy-economy interaction: an overview of the ETA-MACRO model in: Symposium Papers: Energy Modeling and Net Energy Analysis (Institute of Gas Technology. Chicago) 341-351.*
- Manne., A. S., Richels, R., & Weyant, J. (1979). Energy Policy Modeling: A Survey. *Operations Research*, Vol. 27, No. 1, Pp. 1-36, 57(6), 711–717. <https://doi.org/10.1007/sl0551-008-9945-3>
- Marchal, A. (1958). Marché commun européen et zone de libre-échange. *Revue Économique*, 9(2), 255–266. <https://doi.org/10.3406/reco.1958.407295>
- Marcheteau, G. (2020). *Tout savoir sur la réglementation thermique 2020.*
<https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/tout-savoir-sur-la-reglementation-thermique-2020-48152>
- Maréchal, A. (2011). *Économie Écologique : principes de base.* 137–148.
- Marechal, J.-P. (2016). L’Accord de Paris : un tournant décisif dans la lutte contre le changement climatique ? *Géoéconomie*, 78(1), 113. <https://doi.org/10.3917/geoec.078.0113>
- Margallo, M., Ziegler-rodriguez, K., Vázquez-rowe, I., Aldaco, R., Irabien, Á., & Kahhat, R. (2019). Science of the Total Environment Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective : A review for policy support. *Science of the Total Environment*, 689, 1255–1275.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.393>
- Markandya, A. (1990). Environmental costs and power systems planning. *Utilities Policy*, 1(1), 13–27. [https://doi.org/10.1016/0957-1787\(90\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0957-1787(90)90005-6)
- Marrucci, L., Daddi, T., & Iraldo, F. (2019). The integration of circular economy with sustainable consumption and production tools: Systematic review and future research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118268>
- Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badeda, J., Stroe, D. I., Swierczynski, M., & Goikoetxea, A. (2018). Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(April), 701–718.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>
- Masi, D., Day, S., & Godsell, J. (2017). *Supply Chain Configurations in the Circular Economy : A*

Systematic Literature Review. <https://doi.org/10.3390/su9091602>

- Maurel, C. (2013). L'UNESCO un pionnier de l'écologie. *How Languages Are Learned*, 12, 27–40.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle-to-Cradle : Remaking the way how we make things*.
- Mcdowall, W., Geng, Y., Huang, B., & Bartekov, E. (2017). *Circular Economy Policies in China an Europe*. 21(3), 651–661. <https://doi.org/10.1111/jiec.12597>
- McLellan, B. C., Kishita, Y., Yoshizawa, G., Yamaguchi, Y., Aoki, K., & Handoh, I. C. (2014). Assessing Sustainable Regional Energy Systems: A Case Study of Kansai, Japan. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.004>
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The limits to growth*. 65(9), 3944–3946.
- Mercier, M. (2000). *Rapport d'information sur la décentralisation*. 1. <https://www.senat.fr/rap/r99-447-1/r99-447-1.html>
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 703–722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112>
- Messner, S., Golodnikov, A., & Gritsevskii, A. (1996). A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. *Energy*, 21(9), 775–784. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(96\)00025-4](https://doi.org/10.1016/0360-5442(96)00025-4)
- METI. (2003). Handbook on Resource Recycling Legislation and 3R Trends in 2003. *Ministry of Economy Trade and Industry Japan*, 84. <http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/cRecycle3R.pdf>
- Meuric, L. (1973). *FAITS ET CHIFFRES L' évolution annuelle de l' énergie en France*. 59–90.
- Meyer, E. L., & Van Dyk, E. E. (2000). Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature. *Renewable Energy*, 21(1), 37–47. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00124-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00124-X)
- Meylan, F. D., Pigué, F. P., & Erkman, S. (2017). Power-to-gas through CO2 methanation: Assessment of the carbon balance regarding EU directives. *Journal of Energy Storage*, 11, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.12.005>
- Millot, A. (2020). *Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment réaliser l' avènement d' un mythe ? Ariane Millot To cite this version : HAL Id : tel-02897919 Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment réaliser l' avènement d' un mythe ? Ariane Mil*.
- Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales. (2020). *Loi Solidarité et renouvellement urbain (SRU)*. <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/loi-solidarite-et-renouvellement-urbain-sru>
- Ministère de la Transition écologique. (2020). *La Loi Anti-Gaspillage Dans Le Quotidien Des Français: Concretement Ça Donne Quoi ?* https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Document_LoiAntiGaspillage_2020.pdf
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. (2020). *Economie circulaire*. <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire>
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2018). *Plan de déploiement de l'hydrogène*.
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2019a). *Construction de locaux - Résultats à fin février 2019*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/construction-de-locaux-resultats-fin-fevrier-2019-france-entiere>
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2019b). *Programmation pluriannuelle de*

l'énergie.

- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2020a). *Loi énergie-climat*.
<https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2020b). *Stratégie Nationale Bas-carbone*.
- Ministry of the Environment Government of Japan (MEGJ). (2000). *The Basic Act for Establishing a Sound Material-Cycle Society (Act No. 110 of 2000)*. 137, 1–12.
<https://www.env.go.jp/en/laws/recycle/12.pdf>
- Mirakyan, A., Lelait, L., Khomenko, N., & Kaikov, I. (2009). *Methodological Framework for the analysis and development of a sustainable, integrated, regional energy plan – A French region case study*.
- Moffatt, I., & Hanley, N. (2001). *Modelling sustainable development : systems dynamic and input – output approaches*. 16, 545–557.
- Mont, O. K. (2001). Carifying the concept of product-service system. *Proceedings - 2009 1st Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, ACIIDS 2009*, 10, 301–306.
<https://doi.org/10.1109/ACIIDS.2009.18>
- Mooz, W. E. (1973). Projecting California's electrical energy demand. *Energy Modeling, Milton F. Searl, Ed., Resources for the Future, Washington, D.C.*
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153(October 2019), 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Mouhot, J.-F. (2012). Du climat au changement climatique: chantiers, leçons et défis pour l'histoire. *Cultures & Conflits*, 88(4), 19–42. <https://doi.org/10.4000/conflits.18571>
- Müller, B., Gardumi, F., & Hülk, L. (2018). Comprehensive representation of models for energy system analyses: Insights from the Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) 2017. *Energy Strategy Reviews*, 21(July 2017), 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.006>
- Muñoz, P., & Cohen, B. (2017). *Mapping out the sharing economy : A configurational approach to sharing business modeling*. 125, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.03.035>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nadaï, A., Labussière, O., Debourdeau, A., Régnier, Y., Cointe, B., & Dobigny, L. (2015). French policy localism: Surfing on “Positive Energie Territories” (Tepos). *Energy Policy*, 78, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.005>
- Nakata, T. (2004). Energy-economic models and the environment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4), 417–475. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.03.001>
- Nakata, T., & Lamont, A. (2001). *Analysis of the impacts of carbon taxes on energy systems in Japan*. 29.
- NégaWatt. (2014). *Scénario négaWatt 2011-2050. Hypothèses et méthode*.
- Nijkamp, P., & Volwahren, A. (1990). *New directions in integrated regional energy planning*.
- Norgaard, R. B. (1985). *Environmental Economics : An Evolutionary Critique and a Plea for Pluralism* .
- O’Keeffe, S., Majer, S., Drache, C., Franko, U., & Thrän, D. (2017). Modelling biodiesel production within a regional context – A comparison with RED Benchmark. *Renewable Energy*, 108, 355–370. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.024>
- Oberle, S., & Elsland, R. (2019). Are open access models able to assess today's energy scenarios?

- Energy Strategy Reviews*, 26(December 2018), 100396.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100396>
- Observ'ER-Observatoire des énergies renouvelables. (2018). *Suivi du marché et des prix 2017 des pompes à chaleur individuelles*. 1–44.
- Observ'ER-Observatoire des énergies renouvelables. (2020). *Suivi du marché des pompes à chaleur individuelles*.
- ODRÉ. (2017). *Open Data Réseaux Énergies. Registre national des installations de production d'électricité et de stockage (au 31 décembre 2017) - data.gouv.fr*.
<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-national-des-installations-de-production-delectricite-et-de-stockage-au-31-decembre-2017/>
- Ogunmakinde, O. E. (2019). *A Review of Circular Economy Development Models in China, Germany and Japan*. July. <https://doi.org/10.3390/recycling4030027>
- ORECA. (2017). *Evaluation du potentiel de stockage et production énergétique par l'utilisation de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) en provence-Alpes-Cote d'Azur*.
- ORECA. (2019). *Édition 2019*. 5–216.
- Ouharon, A. (2018). *LES NÉGOCIATIONS SUR LE CLIMAT : UN BREF RETOUR SUR L'HISTOIRE*. 157(3), 93–115. <https://www.cairn.info/revue-flux1-2002-2-page-100.htm>
- Painuly, J. P., Rao, H., & Parikh, J. (1995). A rural energy-agriculture interaction model applied to Karnataka state. *Energy*, 20(3), 219–233. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)00069-F](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)00069-F)
- Palafox-Alcantar, P. G., Hunt, D. V. L., & Rogers, C. D. F. (2020). The complementary use of game theory for the circular economy: A review of waste management decision-making methods in civil engineering. *Waste Management*, 102, 598–612.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.014>
- Panda, R. K., Sarkar, T. K., & Bhattacharya, A. K. (1990). Stochastic study of the wind-energy potential of India. *Energy*, 15(10), 921–930. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(90\)90074-C](https://doi.org/10.1016/0360-5442(90)90074-C)
- Pascal, B. (2005). *Energie 2010 : un Plan ambitieux pour la région PACA*. <http://www.ecologie-pratique.org/article.php/20050615111807673>
- Patmore, J., Lau, R., Sidenblad, K., Schaefer, J., & Stangel, D. (1978). Applicability of Brookhaven National Laboratory's Energy Models to Electric Utilify R & D Planning, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, EA-807. (*Systems Control, Inc.*).
- Pauli, G. (2016). *The Blue economy : a report to the club of Rome (Online)*.
- Pauli, G. (2020). *The Blue Economy*.
- Pointereau, R., & Mouiller, P. (2015). *Les dispositions applicables aux collectivités territoriales du projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte. RAPPORT D'INFORMATION au nom de la délégation aux collectivités territoriales et à la décentralisation*.
- Polère, C. (2012). *La prospective. Les fondements historiques". Volume 1. Grand Lyon Prospective. Janvier 2012. 1*.
- Postic, S. (2016). *Sebastien Postic. Long-term energy prospective modeling for South America - Application to inter- national climate negotiations. Environmental Engineering. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015. English. <NNT : 2015ENMP0048>. <tel-01303955>*.
- Postic, S., Selosse, S., & Maïzi, N. (2017). Energy contribution to Latin American INDCs: Analyzing sub-regional trends with a TIMES model. *Energy Policy*, 101, 170–184.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.023>

- Poupeau, F.-M. (2008). *La fabrique d'une solidarité nationale. Etat et élus ruraux dans l'adoption d'une péréquation des tarifs de l'électricité en France.*
- Poupeau, F.-M. (2013a). Quand l'Etat territorialise la politique énergétique. L'expérience des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie. In *Politiques et management public* (Vol. 30, Issue 4). <https://doi.org/10.3166/pmp.30.443-472>
- Poupeau, F.-M. (2013b). X. Les schémas régionaux climat air énergie : la démarche vue par les conseils régionaux. *Droit et Gestion Des Collectivités Territoriales*, 33(1), 183–193. <https://doi.org/10.3406/coloc.2013.2404>
- Poupeau, F. (2004). *Un siècle d'intervention publique dans le secteur de l'électricité en France. B.*
- Poupeau, F. (2010). *Central-Local Relations in French Energy Policy Making and the Environmental Shift : towards a New Pattern of Governance between State and Local Authorities ?* hal-01069419.
- Powell, S., & Oren, S. (1984). *Transition to nondepletable energy : Social planning and market models of capacity expansion.*
- Preston, F. (2012). A Global Redesign? Shaping the Circular Economy. *Energy, Environment and Resource Governance, March*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/0034676042000253936>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- Provence-Alpes-Côte d'Azur. (1999). *Contribution Provence-Alpes-Côte d'Azur au Schéma de service collectif de l'énergie.* <https://side.developpement-durable.gouv.fr/PAE/doc/SYRACUSE/119240/schema-de-service-collectif-de-l-energie-1999-2020-contribution-provence-alpes-cote-d-azur>
- Raja, R., Sooriamoorthi, C. E., Kanniappan, P., & Ramachandran, T. (1997). *Energy planning and optimization model for rural development. A case of sustainable agriculture.* 21(February 1996), 527–547.
- Ramachandra, T. V., Subramanian, D. K., & Joshi, N. V. (1997). Wind energy potential assessment in Uttara Kannada District of Karnataka, India. *Renewable Energy*, 10(4), 585–611. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00034-1)
- Rath-Nagel, S., & Voss, A. (1981). Energy models for planning and policy assessment. *European Journal of Operational Research*, 8(2), 99–114. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90249-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90249-6)
- Région PACA. (2011). *La Région se mobilise pour la maîtrise de la consommation énergétique.* 50–51.
- Région Provence-Alpes-Cote d'Azur. (2013a). *Schéma Régional Climat Air Energie - Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Partie 3, Scénarios et objectifs.* <https://doi.org/10.4267/2042/52064>
- Région Provence-Alpes-Cote d'Azur. (2013b). *Schéma Régionale Climat Air Energie de la région Provence-Alpes-Cote-d'Azur. Partie 2, Tendances, Potentiels et Enjeux.* 75–208.
- Region SUD. (2020). *Plan Régional Hydrogène.* 1–59.
- Région SUD. (2017a). *Schéma Régional Biomasse de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur Volet 1 : Introduction et état des lieux Schéma Régional Biomasse de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.*
- Région SUD. (2017b). *Une COP d'avance: Le plan climat de a région SUD Provence-Alpes-Cote-d'Azur.*

- Région SUD. (2018a). *Annexe, Bilan du Scéhma régionale climat air énergie SRCAE de Provence-Alpes-Côte d'Azur*.
- Région SUD. (2018b). *Bilan du Schéma régional climat air et énergie*.
- Région SUD. (2019). *Plan Climat de la région SUD. Bilan 2019*. 195.
- Reh, L. (2013). Process engineering in circular economy. *Particuology*, 11(2), 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.11.001>
- Rijal, K., Bansa, I N., & Grover, P. (1990). Rural household energy demand modeling. *Energy Economics*, 25(3), 155–162. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(90\)90018-B](https://doi.org/10.1016/0140-9883(90)90018-B)
- Ringkjøb, H. K., Haugan, P. M., & Solbrekke, I. M. (2018). A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(July), 440–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>
- Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). *The Circular Economy A review of definitions, processes and impacts*.
- Roberts, B. H. (2004). The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: An Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 12(8–10), 997–1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.037>
- Rosa, P., Sassanelli, C., & Terzi, S. (2019). Towards Circular Business Models: A systematic literature review on classification frameworks and archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117696. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117696>
- Rozakis, S., Soldatos, P. G., Papadakis, G., Kyritsis, S., & Papantonis, D. (1997). Evaluation of an integrated renewable energy system for electricity generation in rural areas. *Energy Policy*, 25(3), 337–347. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(96\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(96)00132-2)
- RSE&Innovation. (2010). *Le Conseil Régional fait le bilan du programme AGIR qui a financé, sur l'ensemble du territoire, des projets exemplaires, innovants et durables en matière d'économie d'énergie et d'énergies renouvelables*. <http://www.rse-innovation.fr/le-conseil-regional-fait-le-bilan-du-a363.html>
- Ruiz-Real, J. L., Uribe-Toril, J., Valenciano, J. D. P., & Gázquez-Abad, J. C. (2018). Worldwide research on circular economy and environment: A bibliometric analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph15122699>
- Ruppert-Winkel, C., Hussain, W., & Hauber, J. (2016). Understanding the regional process of energy transition in Marin County, California: Applying a Three-Phase-Model based on case studies from Germany. *Energy Research and Social Science*, 14, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.01.003>
- S3D, S. D. & D. D. (2018). *Etude du potentiel de production de biométhane de 2nd génération en région Provence Alpes Côte d'Azur*. 1–67.
- Saavedra, Y. M. B., Iritani, D. R., Pavan, A. L. R., & Ometto, A. R. (2018). Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>
- Sadiqa, A., Gulagi, A., & Breyer, C. (2018). Energy Transition roadmap towards 100% renewable energy and role of storage technologies for Pakistan by 2050. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.027>
- Sailor, V. I., & Rath-Nagel, S. (1980). A Computer Model Designed for Multi-National Energy Systems Analysis. *Seminar on Modelling & Studies (Economic Commission for Europe, Washington DC)*.
- Salvador, R., Barros, M. V., Luz, L. M. da, Piekarski, C. M., & de Francisco, A. C. (2020). Circular

- business models: Current aspects that influence implementation and unaddressed subjects. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119555>
- Santisirisomboon, J., Limmeechokchai, B., & Chungpaibulpatana, S. (2001). Impacts of biomass power generation and CO2 taxation on electricity generation expansion planning and environmental emissions. *Energy Policy*, 29(12), 975–986. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00028-3)
- Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 229, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Sauvé, S., Normandin, D., & McDonald, M. (2016). *L' économie circulaire. Une transition incontournable.*
- Schmidt, J., Schönhart, M., Biberacher, M., Guggenberger, T., Hausl, S., Kalt, G., Leduc, S., Schardinger, I., & Schmid, E. (2012). Regional energy autarky: Potentials, costs and consequences for an Austrian region. *Energy Policy*, 47, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.059>
- Schnurer, H. (2002). *German Waste Legislation and Sustainable Development : Development of waste legislation in Germany towards a sustainable closed substance cycle.* 2–29.
- Schögl, J. P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020). The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research. *Resources, Conservation and Recycling*, 163(July), 105073. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105073>
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Schulz, V., & Stehfest, H. (1984). Regional energy supply optimization with multiple objectives. *European Journal of Operational Research*, 17(3), 302–312. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90124-3)
- Schwaninger, M. (2009). *System Dynamics in the Evolution of the Systems Approach.* In: Meyers R. (eds) *Complex Systems in Finance and Econometrics.* Springer, New York, NY. 753–766. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7701-4_41
- SeLoger. (2017). *Immobilier : Dans quelles régions les logements sont-ils les plus ou les moins spacieux ?* <https://edito.seloger.com/actualites/barometre-lpi-seloger/immobilier-dans-quelles-regions-les-logements-sont-ils-les-plus-ou-les-moins-spacieux-article-16420.html>
- Selosse, S., Garabedian, S., Ricci, O., & Maïzi, N. (2018). The renewable energy revolution of reunion island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.013>
- Şen, Z., & Tan, E. (2001). Simple models of solar radiation data for northwestern part of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 587–598. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00083-2)
- Sénat. (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.* https://www.senat.fr/rap/r12-623/r12-623_mono.html#fn26
- Sgobbi, A., Nijs, W., De Miglio, R., Chiodi, A., Gargiulo, M., & Thiel, C. (2016). How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 19–35.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.004>

- Sgouridis, S., Griffiths, S., Kennedy, S., Khalid, A., & Zurita, N. (2013). A sustainable energy transition strategy for the United Arab Emirates : Evaluation of options using an Integrated Energy Model. *Energy Strategy Reviews*, 2(1), 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2013.03.002>
- Shaahid, S. M., & Elhadidy, M. A. (2003). *Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot climates*. 28, 1741–1753. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00013-2)
- Sharma, D. P., Chandramohanan Nair, P. S., & Balasubramanian, R. (2002). Demand for commercial energy in the state of Kerala, India: An econometric analysis with medium-range projections. *Energy Policy*, 30(9), 781–791. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00138-0)
- Sherratt, A. (2013). Cradle to Cradle. In : *Idowu S.O., Capaldi N., Zu L., Gupta A.D. (eds) Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28036-8>
- Sia Partners, & France Biométhane. (2017). *Observatoire du biométhane*. <http://france-biomethane.fr/>
- Smol, M., Kulczycka, J., & Avdiushchenko, A. (2017). Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(3), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1323-8>
- Springer, U. (2003). *The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol : a survey of model studies*. 25, 527–551.
- Stahel, W.R. and Reday, G. (1976). Jobs for tomorrow: The potential for substituting manpower for energy. *Report to the Commission of the European Communities., April*.
- Stahel, W. R. (2010). *The performance economy*.
- Stahel, W. R. (2019). *The Circular Economy A User's Guide*.
- Stahel, W. R., & Clift, R. (2016). *Stocks and Flows in the Performance Economy*. 137–158. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7>
- Stratta, E. (2016). El Precio Del Crudo Y Su Historia. *Petrotecnica*. <http://www.petrotecnica.com.ar/junio16/PetroSINpublic/Precio.pdf>
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, 42, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- Su, C., & Urban, F. (2021). Circular economy for clean energy transitions: A new opportunity under the COVID-19 pandemic. *Applied Energy*, 289(January), 116666. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116666>
- Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G., & Soto-Onate, D. (2019). *Operational principles of circular economy for sustainable development : Linking theory and practice*. 214, 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271>
- Taranic, I., Behrens, A., & Topi, C. (2016). *Understanding the Circular Economy in Europe , from Resource Efficiency to Sharing Platforms : The CEPS Framework*. 143.
- Taylor, R. H., Probert, S. D., & Carmo, P. D. (1998). French Energy Policy. *Applied Energy*, 59(1), 39–61. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(97\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(97)00055-X)
- The Danish Government. (2018). *Strategy for Circular Economy. September*. <https://stateofgreen.com/en/uploads/2018/10/Strategy-for-Circular-Economy-1.pdf>

- Thellufsen, J. Z., & Lund, H. (2016). Roles of local and national energy systems in the integration of renewable energy. *Applied Energy*, 183, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.005>
- Thiam, D., Benders, R. M. J., & Moll, H. C. (2012). Modeling the transition towards a sustainable energy production in developing nations. *Applied Energy*, 94, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.011>
- Tomić, T., & Schneider, D. R. (2017). Municipal solid waste system analysis through energy consumption and return approach. *Journal of Environmental Management*, 203, 973–987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.070>
- Tomić, T., & Schneider, D. R. (2018). The role of energy from waste in circular economy and closing the loop concept – Energy analysis approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98(September), 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.029>
- Tsayem Demaze, M. (2009). Les conventions internationales sur l'environnement : état des ratifications et des engagements des pays développés et des pays en développement. *L'Information Géographique*, 73(3), 84. <https://doi.org/10.3917/lig.733.0084>
- Türkeli, S., Kemp, R., Huang, B., Bleischwitz, R., & McDowall, W. (2018). Circular economy scientific knowledge in the European Union and China: A bibliometric, network and survey analysis (2006–2016). *Journal of Cleaner Production*, 197, 1244–1261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.118>
- UK-Government. (2018). *OUR WASTE, OUR RESOURCES: A STRATEGY FOR ENGLAND*.
- UK-Parliament, T. P. O. of S. and T. (2016). *Designing a Circular Economy* (Issue 536).
- UNFCCC. (2017a). Intended Nationally Determined Contribution of Turkey. *United Nations Framework Convention on Climate Change, October*, 1–5.
- UNFCCC. (2017b). Mechanisms under the Kyoto Protocol. *Unfccc*.
- United Nations. (n.d.). *De Stockholm A Kyoto : Un Bref Historique Du Changement Climatique*. Retrieved April 15, 2021, from <https://www.un.org/fr/chronicle/article/de-stockholm-kyoto-un-bref-historique-du-changement-climatique>
- United Nations. (1972). *Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment. June 1972*, 1–4.
- United Nations. (2004a). *Division du développement durable-Action 21-chapitre 4*. <https://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/french/action4.htm>
- United Nations. (2004b). *Division du développement durable-Action 21-chapitre 9*. <https://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/french/action9.htm>
- United Nations Environmental Programme. (2007). *Environmental Agreements and Cleaner Production*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7718>
- US-DOE. (1997). *Scenarios of US Carbon Reductions: potential impacts of energy technologies by 2010 and beyond. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy; 1997. Report No. LBNL- 40533, ORNL/CON-444*.
- Vaclav, S. (2010). *Energy Transitions - History, Requirements, Prospects (2010) by Vaclav Smil*.
- Vaillancourt, J.-G. (2002). *Action 21 et le développement durable*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.4172%0ATexto>
- Valenzuela-venegas, G., Salgado, J. C., & Díaz-alvarado, F. A. (2016). Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks : classification and criteria for selection. *Journal of Cleaner Production*, 133, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.113>
- Valorem-Conexia Energy. (2010). *Etude du potentiel de production d'électricité d'origine éolienne*

terrestre en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

- van Buren, N., Demmers, M., van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. *Sustainability (Switzerland)*, 8(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su8070647>
- Vandermerwe, S., & Rada, J. (1988). *Servitization of Business : Adding Value by Adding Services*. 6(4).
- Venkatachalam, L. (2007). Environmental economics and ecological economics: Where they can converge? *Ecological Economics*, 61(2–3), 550–558. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.05.012>
- Veyret-Verner, G. (1961). Electricité et Gaz en France de 1952 à 1960. *Revue de Géographie Alpine*, 49(3), 401–431. <https://doi.org/10.3406/rga.1961.1996>
- Via Sèva. (2017). *L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid*.
- Vie publique. (2021). *En quoi consiste l'expérimentation législative locale ?* <https://www.vie-publique.fr/fiches/20114-en-quoi-consiste-lexperimentation-legislative-locale>
- Vie Publique. (n.d.). *Système de Bretton Woods*. Retrieved July 4, 2021, from <https://www.vie-publique.fr/fiches/38285-systeme-de-bretton-woods-fmi-bird-1944-1971>
- Vie Publique. (2019a). *La révision constitutionnelle relative à l'organisation décentralisée de la République, acte II de la décentralisation*. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/38440-lacte-ii-de-la-decentralisation-la-revision-constitutionnelle>
- Vie Publique. (2019b). *Le bilan des actes I et II de la décentralisation*. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/38502-le-bilan-des-actes-i-et-ii-de-la-decentralisation>
- Vie Publique. (2020). *Qu'est-ce que l'acte I de la décentralisation ?*
- Virlouvet, G. (2015). *Vingt ans de lutte contre le réchauffement climatique en France : bilan et perspectives des politiques publiques*. 296.
- Voss, A. (1984). *Energy Models and Energy Policy Problems*.
- Wautelet, T. (2018). *The Concept of Circular Economy : its Origins and its Evolution*. January, 30. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17021.87523>
- Wene, C. (1980). The optimum mix of conservation and substitution: An example from retrofitting of old buildings. *International Journal of Energy Research*, 4(3), 271–282. <https://doi.org/10.1002/er.4440040309>
- Wene, C. O., & Rydén, B. (1988). A comprehensive energy model in the municipal energy planning process. *European Journal of Operational Research*, 33(2), 212–222. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90372-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90372-4)
- Weyant, J. (1999). *The Costs of the Kyoto Protocol : A Multi-Model Evaluation*.
- Wijkman, A., & Skanberg, K. (2014). The Circular Economy and Benefits for Society: Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency. *Club of Rome*, 1–55. <https://www.clubofrome.org/wp-content/uploads/2016/03/The-Circular-Economy-and-Benefits-for-Society.pdf>
- Williams, J. (1978). *IIASA Proceedings series, Environment, Carbon Dioxide, Climate and Society*.
- Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(October 2015), 825–833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
- Wirl, F., & Szirucsek, E. (1990). Energy modelling - a survey of related topics. *OPEC Review*, 14(3), 361–378. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0076.1990.tb00383.x>

- Wrangham, R., & Carmody, R. (2010). Human adaptation to the control of fire. *Evolutionary Anthropology*, 19(5), 187–199. <https://doi.org/10.1002/evan.20275>
- Yamaji, K., Matsushashi, R., Nagata, Y., & Kaya, Y. (1993). A study on economic measures for CO2 reduction in Japan. *Energy Policy*, 21(2), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90134-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90134-2)
- Yamamoto, H., Yamaji, K., & Fujino, J. (2000). Scenario analysis of bioenergy resources and CO2 emissions with a global land use and energy model. *Applied Energy*, 66(4), 325–337. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(00\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00019-2)
- Yong, R. (2007). The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 121–129. <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0183-z>
- Yuan, Z., Bi, J., & Moriguchi, Y. (2006). *The Circular Economy: A New Development Strategy in China*. 10(1).
- Zeftawy, A. E., & El-Ela, A. (1991). *Optimal Planning of Wind - Diesel Generation Units in an Isolated Area*. 22, 27–33.
- Zongxin, W., & SIDDIQI, T. A. (1995). *THE ROLE OF NUCLEAR ENERGY IN REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF CHINA'S ENERGY USE*. 20(8), 777–783.

VALORISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Papiers scientifiques

- Energy Policy, “Circular economy for the energy system as a leverage for low-carbon transition: long-term analysis of the case of the south-east region of France”, under review
- Applied Energy, “The role of power-to-gas for the integration of variable renewables”, under review
- IAAE's Energy Forum, “Energy transition of local territories: Lessons learned from the case of the SUD PACA region in France”. <https://www.iaee.org/newsletter/issue/110>
- Les Cahiers de la Chaire, “Thirty years since the circular economy concept emerged: has it reached a consensus, Working Paper WP_2021_02_30

Participation aux conférences

- **79th Semi-annual International ETSAP workshop**, 17 - 18 Juin 2021, visioconférence : Assess the transition to a circular economy for the energy system: Long-term analysis of the case of the South-Est region of France
- **1st IAAE Online Conference**, le 7th – 9th Juin 2020, visioconférence : Circular economy for the energy transition: what transformation of territorial energy system?
- **Congrès OSE – Territoires 100 % renouvelables**, Septembre 2020, Sophia Antipolis : Territoires 100 % renouvelables : le cas de la région SUD Provence-Alpes-Cote d’Azur
- **ICAE 2020: 12th International Conference on Applied Energy**, 1 – 10 December 2020, visioconférence : Modeling the energy transition of the south-east region of France: the role of hydrogen for the integration of variable renewables
- **IAPE’20: International Conference on Innovative Applied Energy**, 15 et 16 septembre 2020, Cambridge - Royaume Uni, visioconférence : Modeling the energy transition of the south-east region of France: the role of hydrogen for the integration of variable renewables.
- **77th Semi-annual International ETSAP workshop**, 2 – 3 juillet 2020, visioconférence : Modelling the energy transition of the south-east region of France: the role of hydrogen for the integration of variable renewables
- **75th Semi-annual International ETSAP Workshop**, 6 et 7 juin 2019, IEA, Paris : Modelling the low-carbon energy transition of the territories: a TIMES-SUD PACA model to assess the long-term decarbonization strategy of the south-east region of France
- **ICAE 2019: 11th International Conference on Applied Energy**, 12 à 16 août 2019, Väserås, Sweden : Modeling low-carbon energy transition in the territories: a TIMES-SUDPACA model to assess a long-term decarbonization strategy for the south-east region of France. Paper in conference proceedings : <https://www.energy-proceedings.org/modeling-low-carbon-energy-transition-in-the-territories-a-times-sudpaca-model-to-assess-a-long-term-decarbonization-strategy-for-the-south-east-region-of-france/>
- **3th International Conference on Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions**, 9 au 13 décembre 2019, Modeling low-carbon energy transition in the territories: a TIMES-SUDPACA model to assess a long-term decarbonization strategy for the south-east region of France

- **International Energy Workshop - International Energy Agency**, Jun 2019, Paris, France.
Modeling the low-carbon energy transition of the territories: a TIMES-SUD PACA model to assess the long-term decarbonization strategy of the south-east region of France.
- **Assises de la Transition Écologique et Citoyenne**, Oct 2018, Nice, Panorama énergétique des Alpes-Maritimes : état des lieux et enjeux de transition. France.

Contribution du modèle

- **Activités d'enseignement** : Ce modèle a été utilisé dans le cadre de l'initiation à TIMES et à la mise en perspective des analyses long terme des enjeux de transition énergétique
 - ✓ The first Summer School on prospective Modeling and Energy Transition, organisée par le CMA et soutenue par l'ETSAP, du 8 au 13 juillet 2019, Sophia Antipolis
 - ✓ Mastère Spécialisé Optimisation des Systèmes Énergétiques, CMA - MINES ParisTech, Sophia Antipolis
 - ✓ Ingénieurs Civils (2ème et 3ème année) de MINES ParisTech, Paris
 - ✓ Ingénieurs de MINES Nancy (2ème année)
 - ✓ Master EEET-ET (1ère et 2ème année) de l'INSTN CEA Paris Saclay
 - ✓ Master 2 Développement Industriel de l'Université Côte d'Azur
- **Activités de recherche** : Fourniture de résultats de consommation d'énergie par secteur et par type d'énergie à l'horizon 2025 issus du scénario de référence pour l'élaboration du « Plan de protection de l'Atmosphère de la région SUD PACA » :
 - ✓ Evaluation du PPA des Bouches-du-Rhône 2021
 - ✓ Evaluation du PPA des Alpes-Maritimes 2021
 - ✓ Evaluation du PPA du VAR 2021

L'ensemble des rapports développés sont accessibles sur le lien : <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/la-revision-des-plans-de-protection-de-l-r2771.html>

Médiation scientifique

- **Fête de la science** (Village de sciences et de l'innovation au Palais des Congrès d'Antibes Juan-les-Pins et Festival des sciences de Nice) :
 - ✓ Octobre 2021 : focus économie circulaire
 - ✓ Octobre 2020 : présentation de différentes astuces mathématiques et leurs applications
 - ✓ Octobre 2019 : focus énergies renouvelables et développement durable
 - ✓ Octobre 2018 : focus hydrogène
- « **Pint of Science 2019** » à Nice : Présentation des enjeux de transition énergétique de la région SUD et de l'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de la thèse. Echanges et discussion avec l'audience. Présentation de l'État des lieux et enjeux de transition de la région SUD PACA.
- « **La nuit européenne des chercheurs Cote d'Azur 2020** » dans la section « Fake news », avec une présentation de fake news autour du changement climatique.
- Participation aux **Assises de la Transition Ecologique et Citoyenne des Alpes-Maritimes** en octobre 2018 et présentation du panorama énergétique des Alpes-Maritimes et de ses enjeux de transition.
- **Projet Médites**, intervention dans une classe de collège, 2018.

- **Ouvrage** : Guide de la transition écologique et citoyenne – Alpes Maritimes & Alpes du sud, Article, pages, 87 – 91, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

RÉSUMÉ

La lutte contre le réchauffement climatique et la réduction des tensions dues à l'utilisation des ressources requièrent des changements drastiques quant à la façon dont l'humanité interagit avec l'environnement et comment elle doit concevoir et gouverner les systèmes énergétiques à l'avenir, autrement dit comment arriver à des systèmes durables. La mise en œuvre de cette transition touche notamment les territoires infranationaux où sont localisées la majeure partie de la production des déchets et de la pollution mais également plusieurs ressources dont l'exploitation peut contribuer à l'atteinte d'objectifs ambitieux de décarbonation et de durabilité. Cela place les collectivités locales comme des acteurs incontournables dans cette transition, qui sont davantage pris en compte dans la définition des politiques visant la décarbonation des systèmes énergétiques. En France, la déclinaison de la politique énergétique vers ces territoires atteint une étape importante avec la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte de 2015 car elle invite ces derniers à contribuer à la décarbonation du pays en favorisant la mobilisation des ressources énergétiques locales, renouvelables, en leur donnant davantage de compétences pour le faire. La France envisage également de passer à une économie circulaire, laquelle vise à instaurer un système de consommation et production plus durable, en transformant les déchets en ressources qui seront réutilisées dans le système économique, minimisant ainsi la consommation de ressources et la production de pollution. Pour tous ces enjeux à relever pour construire demain, l'utilisation d'outils de modélisation prospective s'avère déterminante en ce qu'elle permet de répondre aux différentes questions qui émergent dans la poursuite de solutions énergétiques durables et neutres en carbone. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de thèse réside dans l'étude de systèmes énergétiques locaux, en particulier de la région française SUD PACA et des options qui s'offrent à elle pour assurer une transition énergétique et d'économie circulaire. Dans un premier temps, les enjeux énergétiques considérés par des outils de modélisation énergétique ont été discutés en montrant comment singulièrement ces modèles ont convergé vers l'étude de la transition énergétique tant au niveau mondial que national et, en particulier, comment ces études s'appliquent de plus en plus aux systèmes énergétiques de territoires infranationaux. Puis, nous avons mis en évidence le rôle croissant pris par les collectivités territoriales dans la définition et la mise en œuvre de politiques énergie-climat-environnement, en nous concentrant en particulier sur le cas de la France. Malgré l'intérêt croissant porté par les gouvernements, les scientifiques et les entreprises au concept d'économie circulaire comme stratégie pour faire face aux problématiques d'épuisement des ressources, un consensus fait défaut quant à ses principes, objectifs et définition. Pour y contribuer, nous proposons une définition intégrant les aspects clés qui ont été mentionnés dans différentes études concernant ce concept. Finalement, en nous appuyant sur le modèle de prospective TIMES SUD PACA que nous avons construit, nous montrons que les collectivités territoriales sont déterminantes pour atteindre les objectifs de décarbonation nationaux et internationaux, à travers la mobilisation de leurs ressources et l'adoption de politiques de décarbonation ambitieuses adaptées à leur contexte économique et démographique. Pour se faire, l'économie circulaire est un levier incontournable, mais elle doit être accompagnée d'une allocation stratégique de leurs ressources : par exemple dans le cas de la région SUD PACA, destiner l'hydrogène aux poids lourds et à la production de gaz de synthèse, ce dernier devant alors n'être alloué qu'aux secteur industriel, ou encore prioriser la récupération de chaleur dans le secteur résidentiel-tertiaire.

MOTS CLÉS

Modélisation à long terme, TIMES PACA, Transition énergétique bas carbone, Intégration des énergies renouvelables, Power-to-gas, Hydrogène, Système énergétique régional, Économie circulaire

ABSTRACT

Fighting global warming and reducing tensions over resource use requires drastic changes in how humanity interacts with the environment and how it should design and govern energy systems in the future, in other words, how to achieve sustainable systems. The implementation of this transition affects in particular sub-national territories where most of the production of waste and pollution are located, but also several resources whose use can contribute to the achievement of ambitious decarbonization and sustainability objectives. This places local territories as key players in this transition, so they are taken more into account in the definition of policies targeting the decarbonization of the energy system. In France, the implementation of the energy policy towards these territories has reached an important stage with the law relating to the Energy Transition for Green Growth of 2015 because it invites them to contribute to the decarbonization of the country by promoting the mobilization of local renewable energy resources by giving them the competences to do so. France is also considering moving to a circular economy, which aims to establish a more sustainable consumption and production system, by transforming waste into resources that will be reused in the economic system, thus minimizing the consumption of resources and the production of pollution. To propose solutions to all these challenges, the use of prospective modeling tools is decisive, as they can provide with answers to the various questions that emerge in the pursuit of sustainable and carbon neutral energy solutions. In this context, the objective of this work lies in the study of local energy systems, in particular of the French region SUD PACA and the available options that can ensure an energy and circular economy transition. First, the energy issues considered by energy modeling tools were discussed by showing how these models converged singularly towards the study of the energy transition both at the global and national level and, in particular, how these studies are increasingly applicable to the energy systems of sub-national territories. Then, we highlighted the growing role played by local authorities in defining and implementing energy-climate-environment policies, focusing in particular on the case of France. Despite the growing interest by governments, scientists and businesses in the concept of the circular economy as a strategy to deal with issues of resource depletion, a consensus is lacking on its principles, objectives and definition. To contribute to this, we propose a definition that integrates key aspects that have been mentioned in various studies concerning this concept. Finally, based on the TIMES SUD PACA prospective model that we have built, we show that local authorities are decisive in achieving national and international decarbonization objectives, through the mobilization of their resources and the adoption of ambitious decarbonization measures adapted to their economic and demographic context. To do so, the application of a circular economy perspective is essential, but it must be accompanied by a strategic allocation of their resources: for example, in the case of the SOUTH PACA region, targeting hydrogen for freight transport vehicles and for the production of synthesis gas, the latter then having to be allocated only to the industrial sector, or to prioritize heat recovery for the residential-tertiary sector.

KEYWORDS

Long-term modelling, TIMES PACA, Low-carbon transition, Renewable energy integration, Power-to-gas, Hydrogen, Regional energy system, Circular economy