



**THÈSE DE DOCTORAT**  
**DE L'UNIVERSITÉ PSL**

Préparée à MINES ParisTech

**Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment  
réaliser l'avènement d'un mythe ?**

Soutenue par

**Ariane Millot**

Le 15 novembre 2019

École doctorale n°84

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

Spécialité

**Contrôle,      Optimisation,  
Prospective**

Composition du jury :

Patrizia Vignolo Professeure des Universités, Université de Nice-Sophia Antipolis	<i>Présidente du jury</i>
Stefan Aykut Juniorprofessor, Universität Hamburg	<i>Rapporteur</i>
Jean-Charles Hourcade Directeur d'études, EHESS	<i>Rapporteur</i>
François Mirabel Professeur des Universités, Université de Montpellier	<i>Rapporteur</i>
Mathieu Arnoux Professeur des Universités, EHESS	<i>Examineur</i>
Nadia Maïzi Professeure, MINES ParisTech	<i>Directrice de thèse</i>



FAIRE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE OU  
COMMENT RÉALISER L'AVÈNEMENT D'UN MYTHE ?

ARIANE MILLOT

Thèse dirigée par NADIA MAÏZI



Centre de Mathématiques Appliquées  
École des Mines de Paris  
Université PSL

Novembre 2019

*Ariane Millot : Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment  
réaliser l'avènement d'un mythe ?, © Novembre 2019*

## RÉSUMÉ

---

Pour lutter contre le changement climatique et limiter l'élévation des températures, les pays doivent diminuer leurs émissions CO<sub>2</sub> et réaliser ce qu'on appelle communément une *transition énergétique*. Or, ce terme reste ambigu pour comprendre les enjeux associés à la transformation du système énergétique puisqu'il recouvre différents objectifs qui rendent sa gestion d'autant plus compliquée. Le but de cette thèse est donc d'interroger ce terme de *transition énergétique* afin de proposer une nouvelle approche de son pilotage.

Premièrement, un état des lieux du concept de *transition énergétique* est dressé en revenant d'une part sur sa définition, qui s'avère éminemment ambiguë, et d'autre part sur les observations du passé, qui nous montrent qu'un pilotage effectif de la *transition énergétique bas-carbone* sera nécessaire. Dans une deuxième partie, les tentatives contemporaines de pilotage sont analysées dans le cas de la France. On retrace tout d'abord les politiques mises en place jusqu'à aujourd'hui en montrant que le système énergétique français n'a pas réellement engagé une *transition énergétique* correspondant aux objectifs affichés. En s'appuyant sur un modèle de prospective énergétique, le modèle TIMES-France, on examine ensuite les implications d'un objectif de neutralité carbone sur : le niveau de taxe carbone, trop élevé pour être acceptable politiquement et socialement ; les trajectoires de décarbonation, impliquant un bouleversement technologique complet du système énergétique ; et enfin les enjeux spécifiques au cas français grâce à une comparaison avec la situation suédoise.

Enfin, dans une dernière partie, de nouvelles approches du pilotage de la *transition énergétique* sont explorées. Après être revenus sur une proposition d'un courant des sciences sociales, le *Transition Management*, une analogie entre la *transition énergétique* et la théorie de la transition de phase en physique est développée dans le but d'améliorer le pilotage de la *transition énergétique* et d'enrichir la compréhension de cette notion. Elle nous permet de proposer un ensemble de taxes et subventions évoluant dans le temps.

## ABSTRACT

---

To fight climate change and limit the rise in global temperatures, countries must reduce their CO<sub>2</sub> emissions and achieve what is commonly known as an *energy transition*. However, this ambiguous notion covers various objectives, which makes it difficult to understand the challenges involved in transforming the energy system and further complicates its management. The aim of this thesis is to question the

term of *energy transition* in order to propose a new approach to its management.

We begin with an overview of the concept of *energy transition*, which involves both looking at its highly ambiguous definition and observing it throughout history, which indicates that the *low-carbon energy transition* will need to be handled very differently from in the past. In the second part, we analyze French attempts to steer the transition. Our examination of policies implemented to date shows that the French energy system has not really engaged in an *energy transition* that corresponds to the stated objectives. Based on the TIMES-France energy prospective model we then examine the impact of a carbon neutrality target on: the level of carbon tax, which will be too high to be acceptable politically and socially; decarbonization trajectories, which will involve a radical technological change of the energy system; and specific challenges facing France thanks to a comparison with the Swedish situation.

In the last part, we explore new approaches to piloting the *energy transition*. Following a review of a proposal from a branch of the social sciences, *Transition Management*, we develop an analogy between the *energy transition* and the phase transition theory in physics, with the aim of improving control of the *energy transition* and enriching our understanding of this notion. More specifically, it allows us to put forward a set of taxes and subsidies evolving over time.

## REMERCIEMENTS

---

*À la société de consommation et d'abondance, sans laquelle les problèmes climats-énergie n'auraient pas été si captivants !*

La thèse est une aventure et un défi, le plus souvent solitaire mais que l'on ne saurait réussir sans l'entourage et le soutien de nombreuses personnes. Qu'elles en soient ici remerciées.

En premier lieu, je souhaite exprimer toute ma gratitude à Nadia Maïzi, directrice du Centre de Mathématiques Appliquées, pour m'avoir proposé ce sujet passionnant et pour m'avoir accompagnée tout au long de l'élaboration des mes réflexions ; ses idées et sa vision d'ensemble ont été indispensables pour l'aboutissement de cette thèse. Son ouverture d'esprit m'a permis d'explorer de nombreuses pistes et de parcourir plusieurs domaines disciplinaires qui, je l'espère, auront enrichi ce travail. Grâce à son soutien, j'ai pu participer à plusieurs projets enrichissants comme la commission Quinet, bénéficier d'un cadre de travail idéal pour mon sujet de thèse -au sein de la DGEC-, et profiter d'un séjour dans un laboratoire suédois.

Je tiens également à remercier les rapporteurs de ma thèse, Stefan Aykut, Jean-Charles Hourcade ainsi que François Mirabel pour leur lecture attentive de mon manuscrit, ainsi que les autres membres de mon jury, Patrizia Vignolo et Mathieu Arnoux qui ont accepté de contribuer à l'ouverture disciplinaire de cette thèse. Merci pour votre temps consacré à mon travail, pour les commentaires et les échanges passionnants que nous avons eus !

La partie de ma thèse sur les transitions de phase a beaucoup profité des connaissances et des intuitions de Vincent Mazauric. Je lui suis très reconnaissante de m'avoir patiemment expliqué tous ces concepts physiques et de m'avoir soutenue tout au long de l'élaboration des analogies. Merci pour ta disponibilité et ton soutien !

Ce travail a bénéficié du cadre accueillant de la DGEC au sein du ministère de la Transition écologique, qui a plusieurs fois changé de nom au cours de ma thèse ! Je remercie particulièrement Gilles Croquette, directeur du BEPM et Antonin Vergez qui a suivi les premiers mois de mes recherches. Je salue également les autres membres du bureau : Marjorie, Quentin, Isabelle et Pascale ainsi que les autres collègues du DLCES, et tout particulièrement ceux du Bureau marché carbone pour m'avoir fait une place dans leur open space avec une vue imprenable sur la tour Eiffel (il n'y a pas que des inconvénients à travailler à La Défense). J'ai également profité, au cours d'un séjour inoubliable en Suède, de l'hospitalité d'Anna Krook-Riekkola que je remercie chaleureusement pour notre collaboration.

Je remercie évidemment l'ensemble de l'équipe du CMA, un lieu où il est toujours très agréable de venir travailler. Merci à Amel, Sébastien, Damien, Sophie, Gilles, merci à Paulo pour les discussions sur l'optimisation, merci à Edi pour m'avoir initié au modèle TIMES et avoir répondu à mes innombrables questions, merci à Sandrine pour m'avoir soutenue dans la dernière ligne droite, et enfin un grand merci à Catherine pour avoir géré avec une efficacité redoutable tous les aspects administratifs.

Mes séjours au CMA ont également été agrémentés de nombreuses discussions, parfois passionnées et toujours très enrichissantes, avec les autres doctorants de l'équipe, les anciens devenus depuis longtemps docteurs, François, Sébastien, Vincent, Thomas, Seungwoo, Gratien et Rémy, et les petits nouveaux à qui je souhaite bonne chance, Matthieu, Gildas, Carlos, Mathilde, Rabab et Paul.

Cette thèse n'aurait également pas pu aboutir sans le wifi de qualité de la SNCF, qui -il est important de le noter- permet sans problème d'accéder à Sci-Hub et LibGen, sans la merveilleuse invention qu'est Airbnb ainsi que sans les sorties régulières pendant l'été au meilleur glacier du monde à Antibes (et ce, sans verser dans le superlatif!).

Mes amis m'ont également été indispensables pour me changer les idées, parfois déprimantes de ma thèse (pas facile tous les jours de se dire que nous ne faisons pas assez pour éviter des dommages irréversibles sur l'environnement et notre société!), je remercie donc Sophie, Laure, Amine, Daniel, Paul-Hervé, Marie, Anaïs et tant d'autres!

Je remercie ma famille, ma cousine Clara, ma sœur Léa, et tout particulièrement mes parents de m'avoir accompagnée dans cette aventure. Enfin et surtout, merci à Edouard pour son soutien patient et inébranlable, pour ses relectures, pour nos discussions interminables, pour sa foi en ma réussite et pour les milles et une petites choses que nous partageons ensemble.

## TABLE DES MATIÈRES

---

Introduction	2
<b>I ÉTAT DES LIEUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE</b>	
1 RETOUR SUR LE CONCEPT DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	9
1.1 Apparition de la notion	10
1.2 Transition énergétique : un concept flou et ambigu	14
1.3 Délimitation du concept de transition énergétique bas-carbone	17
1.4 Les transitions énergétiques vues par les Sustainability Transitions	21
1.4.1 Les <i>Sustainability Transitions</i> : une approche pluridisciplinaire de la transition	21
1.4.2 Un cadre théorique d'analyse de la transition	23
1.4.3 Les chemins de transition	26
1.4.4 Spécificité de la transition bas-carbone	27
1.5 Problématique générale de la thèse	29
2 QUE NOUS ENSEIGNE L'HISTOIRE ?	33
2.1 Retour historique sur les transitions énergétiques	35
2.1.1 Une rétrospective de long terme	36
2.1.2 La révolution industrielle	41
2.1.3 Florilège de transitions énergétiques remarquables	47
2.2 Caractériser les moteurs des transitions énergétiques	51
2.2.1 La temporalité des transitions	52
2.2.2 Le rôle essentiel de l'innovation technologique	54
2.2.3 Des services nouveaux et moins chers	55
2.2.4 L'augmentation de la consommation d'énergie	56
2.2.5 La géographie des ressources	57
2.2.6 Le soutien institutionnel	57
2.3 Les défis de la transition énergétique bas-carbone	58
2.3.1 Une transition dirigée et pas spontanée	58
2.3.2 Le risque de <i>carbon lock-in</i>	60
2.3.3 Une fenêtre d'action étroite	61
2.3.4 Retour à une économie organique ?	61
2.3.5 Le rôle incertain de l'innovation technologique	62
2.3.6 L'acceptabilité sociale	63
2.4 Conclusion	64
<b>II LES TENTATIVES DE CONTRÔLE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE</b>	
3 LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE DOMINÉE PAR DES INTÉRÊTS ÉCONOMIQUES	69

3.1	Une politique énergétique française marquée par le nucléaire . . . . .	69
3.1.1	Nucléaire : un programme technocratique . . . . .	70
3.1.2	Remettre en cause le nucléaire ? . . . . .	71
3.1.3	Les énergies renouvelables électriques . . . . .	73
3.1.4	La biomasse, une énergie au potentiel sous-exploité . . . . .	73
3.1.5	Le chauffage urbain, un développement limité au profit du chauffage électrique . . . . .	74
3.2	Une convergence progressive des thématiques de l'environnement et de l'énergie . . . . .	75
3.2.1	L'État face à la croissance énergétique . . . . .	75
3.2.2	Un État soucieux de l'indépendance énergétique . . . . .	76
3.2.3	L'institutionnalisation du changement climatique . . . . .	78
3.3	Objectifs et gouvernance de la transition énergétique en France . . . . .	82
3.3.1	Évolution des objectifs de la transition énergétique . . . . .	82
3.3.2	Processus de fabrication des scénarios de la DGEC . . . . .	87
3.3.3	Gouvernance et suivi de la transition . . . . .	93
3.3.4	Les autres gouvernances de la transition énergétique . . . . .	99
3.4	Insuffisance de l'évolution du système énergétique vis-à-vis des objectifs climatiques . . . . .	107
3.4.1	L'évolution des demandes de service énergétique . . . . .	107
3.4.2	L'évolution du mix énergétique . . . . .	111
3.4.3	L'évolution des émissions de GES et CO <sub>2</sub> . . . . .	113
3.5	Conclusion . . . . .	117
4	QUEL FUTUR POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE EN FRANCE ? . . . . .	123
4.1	Le contrôle par la taxe carbone . . . . .	124
4.1.1	Déclinaison française de la taxe carbone . . . . .	126
4.1.2	Les résultats de la commission Quinet 2019 . . . . .	127
4.1.3	Une taxe carbone difficile à mettre en œuvre . . . . .	136
4.2	Conflits entre trajectoire neutralité et LTECV . . . . .	140
4.2.1	Hypothèses de l'exercice prospectif . . . . .	142
4.2.2	Les difficultés pour atteindre la neutralité carbone . . . . .	148
4.2.3	Les différences entre un scénario Neutralité et un scénario LTECV . . . . .	162
4.2.4	Discussion et conclusion . . . . .	171
4.3	Le poids des décisions passées : enseignement d'une analyse comparative avec la Suède . . . . .	173
4.3.1	La politique énergétique en Suède . . . . .	174
4.3.2	Les futures trajectoires des systèmes énergétiques . . . . .	184
4.3.3	Une disparité des orientations . . . . .	194
4.4	Conclusion . . . . .	197

<b>III COMMENT PILOTER UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?</b>	
<b>5</b>	<b>LA GOUVERNANCE ISSUE DES SUSTAINABILITY TRANSITIONS</b> . . . . . 200
5.1	Le Transition Management . . . . . 200
5.2	Les critiques du mouvement . . . . . 205
5.3	Conclusion . . . . . 209
<b>6</b>	<b>QUELS APPORTS DU PHÉNOMÈNE DE TRANSITION DE PHASE EN PHYSIQUE ?</b> . . . . . 211
6.1	Éléments de la physique des transitions de phase . . . . . 214
6.1.1	Équilibre thermodynamique . . . . . 214
6.1.2	Classification des transitions . . . . . 217
6.2	Analogie inspirée d'Ehrenfest . . . . . 219
6.2.1	Déclinaison de l'analogie . . . . . 222
6.2.2	Détermination du profil de taxes et subventions . . . . . 223
6.2.3	Résultats avec un modèle simplifié à 3 années et 3 technologies . . . . . 226
6.2.4	Résultats avec un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies . . . . . 229
6.2.5	Résultats avec un modèles TIMES . . . . . 234
6.2.6	Conclusion . . . . . 237
6.3	Analogie inspirée de Landau . . . . . 240
6.3.1	De la classification de Landau aux phénomènes critiques : lois d'universalité . . . . . 240
6.3.2	Déclinaison de l'analogie . . . . . 244
6.3.3	Élaboration de chemins de transition dans deux cas simplifiés . . . . . 253
6.4	Conclusion . . . . . 259
	Conclusion . . . . . 262
<b>Annexes</b>	
<b>A</b>	<b>PRÉSENTATION DES MODÈLES TIMES</b> . . . . . 268
A.1	Description générale . . . . . 268
A.2	Un modèle intégré du système énergétique . . . . . 268
A.3	Un modèle d'optimisation linéaire piloté par la demande . . . . . 269
<b>B</b>	<b>STRUCTURE DU MODÈLE TIMES-FRANCE</b> . . . . . 272
B.1	Remarques générales . . . . . 272
B.2	Le découpage temporel du modèle . . . . . 273
B.3	Industrie . . . . . 274
B.3.1	Sidérurgie . . . . . 275
B.3.2	Aluminium . . . . . 275
B.3.3	Cuivre . . . . . 276
B.3.4	Ammoniac . . . . . 276
B.3.5	Chlore . . . . . 276
B.3.6	Ciment et Chaux . . . . . 277
B.3.7	Verre . . . . . 277
B.3.8	Papier . . . . . 277

B.3.9	Autres branches . . . . .	278
B.3.10	Hypothèses générales . . . . .	278
B.4	Transport . . . . .	279
B.4.1	Transport routier . . . . .	279
B.4.2	Transport ferroviaire . . . . .	282
B.4.3	Transport maritime et aérien . . . . .	282
B.4.4	Hypothèses générales . . . . .	282
B.5	Résidentiel . . . . .	283
B.6	Tertiaire . . . . .	285
B.7	Agriculture . . . . .	288
B.8	Production d'électricité et de chaleur . . . . .	288
B.8.1	Production d'électricité . . . . .	288
B.8.2	Production de chaleur . . . . .	290
B.9	Supply . . . . .	292
C	BILANS DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFETS DE SERRE	294
D	ÉVOLUTION DU MIX ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE DANS CHAQUE SECTEUR	297
E	RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DU SCÉNARIO centralv3_ sd	300
F	RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DES SCÉNARIOS neu- tralités ET ltecv	302
G	RECHERCHE DE SOLUTIONS MULTIPLES POUR UN PRO- BLÈME D'OPTIMISATION LINÉAIRE	306
H	DESCRIPTION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ	309
I	MODÈLE SIMPLIFIÉ À 3 ANNÉES ET 3 TECHNOLOGIES	310
J	MODÈLE SIMPLIFIÉ À 3 ANNÉES ET 6 TECHNOLOGIES	312
	BIBLIOGRAPHIE	315

## TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	Publications contenant les termes <i>energy transition</i>	11
FIGURE 1.2	Quatre trajectoires mondiales d'émissions CO <sub>2</sub> pour atteindre l'objectif 1,5°C . . . . .	20
FIGURE 1.3	Les quatre phases d'une transition . . . . .	24
FIGURE 1.4	Le <i>Multi-Level Perspective</i> sur les transitions . .	25
FIGURE 2.1	Évolution de la consommation énergétique primaire au niveau mondial en % . . . . .	37
FIGURE 2.2	Évolution de la consommation énergétique primaire au niveau mondial . . . . .	38
FIGURE 3.1	Trajectoires issues du <b>DNTE</b> . . . . .	84
FIGURE 3.2	Articulation des différents modèles utilisés pour les scénarios prospectifs 2014-2015 de la France	89
FIGURE 3.3	Articulation des outils de planification . . . . .	98
FIGURE 3.4	Consommation d'énergie finale par secteur en France . . . . .	107
FIGURE 3.5	Production des <b>IGCE</b> . . . . .	108
FIGURE 3.6	Évolution du transport de voyageurs et de marchandises . . . . .	109
FIGURE 3.7	Évolution du parc dans le secteur résidentiel .	110
FIGURE 3.8	Évolution des surfaces dans le secteur tertiaire	110
FIGURE 3.9	Consommation d'énergie primaire en France .	111
FIGURE 3.10	Consommation d'énergie finale en France . . .	112
FIGURE 3.11	Évolution d'indicateurs en France . . . . .	113
FIGURE 3.12	Évolution des émissions CO <sub>2</sub> en France, hors <b>UTCATF</b> . . . . .	114
FIGURE 3.13	Évolution des émissions de <b>GES</b> en France, hors <b>UTCATF</b> . . . . .	115
FIGURE 4.1	Contrainte sur les émissions CO <sub>2</sub> . . . . .	131
FIGURE 4.2	Coût marginal du CO <sub>2</sub> . . . . .	133
FIGURE 4.3	Émissions résiduelles en 2050 . . . . .	134
FIGURE 4.4	Investissement supplémentaire par secteur dans <b>CentralV3_SD</b> par rapport à <b>Ref_SD</b> . . . . .	136
FIGURE 4.5	Valeur de l'action pour le climat . . . . .	139
FIGURE 4.6	Consommation d'énergie finale dans les scénarios Neutralité . . . . .	153
FIGURE 4.7	Émissions CO <sub>2</sub> dans les scénarios Neutralité	154
FIGURE 4.8	Émissions CO <sub>2</sub> capturées et stockées dans les scénarios Neutralité . . . . .	154
FIGURE 4.9	Coût marginal du CO <sub>2</sub> dans les scénarios Neutralité	155
FIGURE 4.10	Consommation d'énergie finale de l'industrie dans les scénarios Neutralité . . . . .	156

FIGURE 4.11	Consommation d'énergie finale du transport dans les scénarios Neutralité . . . . .	157
FIGURE 4.12	Consommation d'énergie finale des bâtiments dans les scénarios Neutralité . . . . .	158
FIGURE 4.13	Capacités électriques dans les scénarios Neutralité	159
FIGURE 4.14	Production d'électricité dans les scénarios Neutralité	160
FIGURE 4.15	Consommation d'électricité dans les scénarios Neutralité . . . . .	160
FIGURE 4.16	Production de chaleur dans les scénarios Neutralité	161
FIGURE 4.17	Consommation d'énergie finale dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	163
FIGURE 4.18	Composition du vecteur gaz dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	163
FIGURE 4.19	Émissions CO <sub>2</sub> capturées et stockées dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	164
FIGURE 4.20	Émissions CO <sub>2</sub> dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	165
FIGURE 4.21	Coût marginal du CO <sub>2</sub> dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	166
FIGURE 4.22	Consommation d'énergie finale de l'industrie dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV	167
FIGURE 4.23	Consommation d'énergie finale du transport dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV	168
FIGURE 4.24	Consommation d'énergie finale des bâtiments dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV	169
FIGURE 4.25	Capacités électriques dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	170
FIGURE 4.26	Production d'électricité dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	170
FIGURE 4.27	Production de chaleur dans les scénarios NeutralityV2_CCSLow et LTECV . . . . .	171
FIGURE 4.28	Consommation d'énergie primaire en France et en Suède . . . . .	178
FIGURE 4.29	Consommation d'énergie finale en France et en Suède . . . . .	179
FIGURE 4.30	Consommation d'énergie finale entre 2015 et 2050 en France et en Suède . . . . .	186
FIGURE 4.31	Composition du gaz en France . . . . .	187
FIGURE 4.32	Production d'électricité en France et en Suède	188
FIGURE 4.33	Capacités de production d'électricité en France et en Suède . . . . .	189
FIGURE 4.34	Consommation d'énergie finale dans les bâtiments et l'agriculture en France et en Suède .	190
FIGURE 4.35	Consommation d'énergie finale dans l'industrie en France et en Suède . . . . .	191

FIGURE 4.36	Consommation d'énergie finale dans le transport en France et en Suède . . . . .	192
FIGURE 4.37	Émissions CO <sub>2</sub> en France et en Suède . . . . .	193
FIGURE 4.38	Coût marginal du CO <sub>2</sub> en France et en Suède . . . . .	193
FIGURE 5.1	Le cycle du <i>Transition Management</i> . . . . .	202
FIGURE 6.1	Évolution du potentiel de Gibbs $\mathcal{G}$ , de l'enthalpie libre $G$ et de la température $T$ pour des transitions du 1 <sup>er</sup> ordre . . . . .	218
FIGURE 6.2	Évolution du potentiel de Gibbs $\mathcal{G}$ , de l'enthalpie libre $G$ et de la température $T$ pour des transitions du 2 <sup>nd</sup> ordre . . . . .	220
FIGURE 6.3	Diagramme de phases de l'eau . . . . .	221
FIGURE 6.4	Solution BAU et $\min\_emi$ pour un modèle simplifié à 3 technologies . . . . .	226
FIGURE 6.5	Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 technologies avec l'approche 1 . . . . .	227
FIGURE 6.6	Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 3 technologies avec l'approche 1 . . . . .	228
FIGURE 6.7	Solution BAU et $\min\_emi$ pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies . . . . .	229
FIGURE 6.8	Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 1 . . . . .	230
FIGURE 6.9	Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 1 . . . . .	231
FIGURE 6.10	Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 2 . . . . .	232
FIGURE 6.11	Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 2 . . . . .	233
FIGURE 6.12	Résultats pour un modèle TIMES avec l'approche 1 . . . . .	235
FIGURE 6.13	Résultats pour un modèle TIMES avec l'approche 2 . . . . .	236
FIGURE 6.14	Espace primal des solutions du problème d'optimisation . . . . .	244
FIGURE 6.15	Évolution de $\mathcal{C}$ en fonction de $x_1$ . . . . .	245
FIGURE 6.16	Espace dual des solutions du problème d'optimisation . . . . .	245
FIGURE 6.17	Chemins de transition . . . . .	246
FIGURE 6.18	Aires associées aux investissements sacrifiés . . . . .	247
FIGURE 6.19	Exemple de chemin de transition quasi-statique . . . . .	249
FIGURE 6.20	Évolution de $x_1$ suivant différentes valeur de $k$ pour $c = 50$ . . . . .	251
FIGURE 6.21	Chemin de transition quasi-statique . . . . .	252
FIGURE 6.22	Diagramme de phase, cas à 3 technologies . . . . .	257
FIGURE A.1	Schéma simplifié de TIMES-France . . . . .	269
FIGURE B.1	Découpage temporel de TIMES-France . . . . .	274

FIGURE B.2	Évolution du parc nucléaire existant . . . . .	289
FIGURE D.1	Consommation d'énergie finale dans le secteur de l'industrie . . . . .	297
FIGURE D.2	Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport . . . . .	298
FIGURE D.3	Consommation d'énergie finale dans les secteurs du résidentiel et tertiaire . . . . .	298
FIGURE D.4	Consommation d'énergie finale dans le secteur de l'agriculture . . . . .	299
FIGURE E.1	Consommation d'énergie finale totale dans CentralV3_S - SD . . . . .	300
FIGURE E.2	Consommation d'énergie finale sectorielle dans CentralV3_S - SD . . . . .	301
FIGURE E.3	Émissions CO <sub>2</sub> dans CentralV3_S - SD . . . . .	301
FIGURE F.1	Utilisation de la biomasse dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	302
FIGURE F.2	Consommation d'énergie finale dans l'agriculture dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	303
FIGURE F.3	Évolution du parc de véhicules dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	303
FIGURE F.4	Technologies pour le chauffage et l'Eau chaude sanitaire (ECS) dans le secteur résidentiel dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	304
FIGURE F.5	Technologies pour le chauffage et l'ECS dans le secteur tertiaire dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	304
FIGURE F.6	Investissements par secteur dans NeutralitV2_- CCSLow et LTECV . . . . .	305

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLE 1.1	Définitions de la transition énergétique selon divers auteurs . . . . .	18
TABLE 1.2	Les quatre types de transition d'après GEELS et SCHOT (2007) . . . . .	28
TABLE 3.1	Les grands objectifs de la politique énergétique en France . . . . .	86
TABLE 3.3	Inventaire (non exhaustif) des principaux rapports d'évaluation de la transition bas-carbone prévus par la LTECV de 2015 . . . . .	100
TABLE 3.5	Comparaison des comités d'experts en France, en Allemagne et au Royaume-Uni en 2018 . . . . .	106

TABLE 4.1	Index fournis par ThreeME pour l'évolution des demandes . . . . .	129
TABLE 4.2	Évolution des prix des énergies fossiles . . . . .	129
TABLE 4.3	Potentiel de biomasse en 2050 . . . . .	130
TABLE 4.4	Potentiel des EnR électriques . . . . .	130
TABLE 4.5	Scénarios produits pour la commission Quinet	132
TABLE 4.7	Valeurs du coût marginal pour les scénarios NP	134
TABLE 4.8	Surcoût des scénarios par rapport à un scénario de référence (NP ou SD) . . . . .	135
TABLE 4.9	Coût marginal du CO <sub>2</sub> pour des variantes sur la disponibilité des technologies . . . . .	135
TABLE 4.10	Impact d'une taxe sur des produits énergétiques d'origine fossile . . . . .	138
TABLE 4.12	Scénarios Neutralité et LTECV . . . . .	143
TABLE 4.14	Évolution des demandes dans l'industrie . . . . .	144
TABLE 4.15	Évolution des demandes dans le transport . . . . .	145
TABLE 4.16	Évolution des demandes dans le résidentiel . . . . .	146
TABLE 4.17	Évolution des demandes dans le tertiaire . . . . .	147
TABLE 4.18	Évolution des demandes dans l'agriculture . . . . .	148
TABLE 4.19	Faisabilité des scénarios Neutralité . . . . .	152
TABLE 4.20	Indicateurs économiques et émissions pour la France, la Suède et l'Union européenne (UE) . . . . .	176
TABLE 6.1	Analogie inspirée d'Ehrenfest entre transition de phase et transition énergétique . . . . .	222
TABLE 6.6	Analogie entre transition de phase et transition énergétique . . . . .	243
TABLE 6.9	Solutions avec la méthode du surcoût, cas à 2 technologies . . . . .	255
TABLE 6.11	Solutions avec la méthode budget, cas à 2 technologies . . . . .	255
TABLE 6.14	Solutions avec la méthode surcoût, cas à 3 technologies . . . . .	258
TABLE 6.15	Solutions avec la méthode budget, cas à 3 technologies . . . . .	259
TABLE B.1	Demandes du secteur de l'industrie . . . . .	274
TABLE B.2	Taux annuel d'évolution dans l'industrie . . . . .	278
TABLE B.3	Taux de recyclage dans l'industrie . . . . .	279
TABLE B.4	Demandes du secteur du transport . . . . .	280
TABLE B.5	Coûts d'investissement des voitures en k€/véhicule <sup>281</sup>	
TABLE B.7	Taux annuel d'évolution dans le transport . . . . .	282
TABLE B.8	Demandes du secteur résidentiel . . . . .	283
TABLE B.9	Technologies du secteur résidentiel . . . . .	284
TABLE B.10	Taux annuel d'évolution . . . . .	285
TABLE B.11	Demandes du secteur tertiaire . . . . .	286
TABLE B.12	Technologies du secteur tertiaire . . . . .	287
TABLE B.13	Demandes du secteur de l'agriculture . . . . .	288

TABLE B.14	Parc de production d'électricité en 2014 . . . . .	289
TABLE B.15	Facteur de charge moyen par <i>Time Slice</i> (TS) . .	290
TABLE B.16	Potentiel de l'éolien et du solaire . . . . .	290
TABLE B.17	Coûts d'investissement des moyens de production d'électricité . . . . .	291
TABLE B.18	Contrainte annuelle maximale d'installation .	292
TABLE B.19	Potentiel en Mtep de biomasse . . . . .	292
TABLE C.1	Émissions de GES et CO <sub>2</sub> en France . . . . .	295
TABLE C.2	Comparaison des émissions CO <sub>2</sub> entre le bilan CITEPA et le calcul à partir du bilan d'énergie finale d'Eurostat pour l'année 2014 . . . . .	296
TABLE I.1	Données des technologies utilisées et niveaux de demande pour le modèle à 3 technologies .	310
TABLE I.4	Solution du BAU (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies) . . . . .	310
TABLE I.5	Solution du min_emi (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies) . . . . .	311
TABLE I.6	Système de taxe pour transiter vers min_emi (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies) avec l'approche 1 . . . . .	311
TABLE J.1	Données des technologies utilisées et niveaux de demande pour le modèle à 6 technologies .	312
TABLE J.4	Solution du BAU (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) . . . . .	313
TABLE J.5	Solution du min_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) . . . . .	313
TABLE J.6	Système de taxe pour transiter vers min_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) avec l'approche 1 . . . . .	313
TABLE J.7	Système de taxe pour transiter vers min_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) avec l'approche 2 . . . . .	314

## ACRONYMES

---

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AIE	Agence internationale de l'énergie
AME	Avec Mesures Existantes
AMS	Avec Mesures Supplémentaires
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
BAU	<i>Business as usual</i>
BECCS	<i>Bioenergy with carbon capture and storage</i>

BEPM	Bureau des émissions, projections et modélisations
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CCC	<i>Committee on Climate Change</i>
CCNUCC	Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CESE	Conseil économique, social et environnemental
CETE	Comité d'experts pour la transition énergétique
CGDD	Commissariat général au développement durable
CGEDD	Conseil général de l'environnement et du développement durable
CIREN	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CNTE	Conseil national de la transition écologique
COGEMA	Compagnie générale des matières nucléaires
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CSE	Conseil supérieur de l'environnement
CSPE	Contribution au service public de l'électricité
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DGEMP	Direction générale de l'énergie et des matières premières
DNTE	Débat national sur la transition énergétique
ECS	Eau chaude sanitaire
EDF	Électricité de France
EnR	Énergies renouvelables
EPR	Réacteur européen à eau pressurisée
ETS	<i>Emissions Trading System</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HCC	Haut conseil pour le climat
IAM	<i>Integrated Assessment Model</i>
Iddri	Institut du développement durable et des relations internationales
IGCE	Industries grandes consommatrices d'énergie
LTECV	Loi de transition énergétique pour la croissance verte
LULUCF	<i>Land Use, Land-Use Change, and Forestry</i>
MIES	Mission interministérielle sur l'effet de serre
MLP	<i>Multi-Level Perspective</i>

MMR	<i>Monitoring Mechanism Regulation</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
OPEC	Organisation des pays exportateurs de pétrole
PAC	Pompe à chaleur
PCAET	Plan climat-air-énergie territorial
PIB	Produit intérieur brut
PLF	Projet de loi de finances
PNLCC	Programme national de lutte contre le changement climatique
POPE	Programme d'orientation de la politique énergétique
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
PV	Photovoltaïque
SCSIN	Service central de sûreté des installations nucléaires
SEQE	Système d'échange de quotas d'émission
SNBC	Stratégie nationale bas-carbone
SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SRCAE	Schéma régional climat air énergie
SUV	<i>Sport utility vehicle</i>
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes
TM	<i>Transition Management</i>
UE	Union européenne
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
VUL	Véhicule utilitaire léger

## PROPOS INTRODUCTIF

## INTRODUCTION

---

*Le réchauffement climatique  
Ce fuel qui tache le firmament*

— Jacques Perry-Salkow

Depuis plusieurs décennies, les scientifiques alertent sur les menaces que représentent les changements climatiques. Les conséquences de la montée des températures moyennes sont nombreuses : modification du climat, augmentation des événements climatiques extrêmes (canicules, cyclones), montée des eaux, acidification de l'océan, etc. Tous ces événements ont un impact important sur les écosystèmes et certains scientifiques alertent déjà sur une 6<sup>ème</sup> extinction de masse de la biodiversité (IPBES, 2019), également favorisée par la multiplication des atteintes à l'environnement causées par les activités humaines. Cette crise écologique va profondément bouleverser nos sociétés : l'agriculture qui devra s'adapter à un nouveau climat, le stress hydrique qui pourrait s'accroître dans certaines régions ou encore les risques sur les infrastructures sont quelques-unes des conséquences auxquelles nous devons faire face. Les sociétés humaines sont inégalement armées pour répondre à ces menaces mais aussi pour s'y adapter et les pays les plus pauvres sont généralement les plus vulnérables aux impacts du changement climatique.

Pour limiter les effets du réchauffement climatique, les émissions de gaz à effet de serre (GES), qui constituent la cause principale de ce phénomène, doivent diminuer. Plus leur réduction sera importante et surviendra rapidement, plus les chances de contenir l'élévation des températures seront améliorées. Depuis les années 1990, les États cherchent donc à endiguer l'augmentation mondiale des émissions de GES. Les négociations internationales ont notamment abouti en 2015 à l'adoption de l'accord de Paris qui prévoit de « contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels » (article 2). Pour satisfaire cet objectif, l'accord incite les signataires à atteindre collectivement la neutralité carbone durant la deuxième moitié de ce siècle (article 4).

Tous les pays sont donc appelés à réaliser une *transition énergétique* et ce, le plus rapidement possible afin de réduire les émissions de GES et de répondre à l'« urgence climatique ». Il nous a donc paru opportun de nous interroger sur ce que signifiait cette expression de transition énergétique qui s'est particulièrement répandue depuis quelques années.

Au niveau mondial, certains considèrent que la transition énergétique a déjà commencée car l'accord de Paris serait une « prophétie auto-réalisatrice » (ROGER et BARROUX, 2016, comme Laurence Tubiana, voir) et ce, bien que le système énergétique repose encore principalement aujourd'hui sur le pétrole et le charbon. L'électrification observée ces dernières années n'a en effet pas encore eu un impact important sur la structure du mix énergétique. Le déclin du charbon, annoncé par une myriade de titres de journaux accrocheurs semble présomptueux, comme le soulignent EDENHOFER et al. (2018) qui montrent que les investissements actuels et prévus dans les centrales à charbon font peser une sérieuse menace à l'atteinte de l'objectif des 2°C ou 1,5°C. La faisabilité de l'objectif adopté dans l'accord de Paris est ainsi fortement remise en question (BROWN et al., 2019; PETERS, ANDREW, BODEN et al., 2013). Pour RAFTERY et al. (2017), il est peu probable que l'augmentation des températures se limite à 2°C et donc a fortiori à 1,5°C malgré les mesures mises en place pour limiter les émissions. Les stocks actuels d'énergies fossiles, principales sources des émissions de GES, sont d'ailleurs amplement suffisants pour nous éloigner durablement de cet objectif. En tout état de cause, le déclin des émissions mondiales ne semble pas pouvoir être atteint dans les prochaines années (ROGELJ et al., 2015; JACKSON et al., 2016; PETERS, ANDREW, CANADELL et al., 2017). Les projections nous placent d'ailleurs plutôt sur une trajectoire nous amenant à un réchauffement de 3 à 4°C d'après le **Climate Action Tracker**, voire 7°C pour les évaluations les plus pessimistes récemment publiées par les modèles climatiques français (GARRIC, 2019).

Ainsi, et bien que beaucoup proclament que la transition énergétique soit en cours, nous avons voulu nous interroger sur ce qu'il en était réellement en nous basant sur des éléments tangibles d'évaluation. Nous nous limiterons au cas de la France, où là aussi, de nombreux acteurs défendent la vision d'un pays vertueux sur le plan climatique. Bien que la France émette relativement moins d'émissions de GES que d'autres pays développés, cette caractéristique ne suffit pas à garantir sa transition énergétique. Car comme nous le verrons, réfléchir aux conditions d'émergence de la transition énergétique consiste à envisager la question qui en découle, celle du pilotage de la transition énergétique. Celle-ci est en effet posée en creux par l'adoption de l'accord de Paris. Pour atteindre l'objectif des 2°C, ROCKSTRÖM et al. (2017) préconisent que le pic des émissions doive survenir au plus tard en 2020, ce qui laisse peu de temps pour inverser la tendance à la croissance des émissions et modifier les systèmes énergétiques. Les pays se sont donc engagés sur des objectifs particulièrement ambitieux mais sans toutefois disposer de stratégies pour y parvenir. Comme le souligne GODARD (2016), « l'accord de Paris est un texte marqué à vif par le déséquilibre entre objectif et moyens ». Cet accord a ainsi consacré une « gouvernance incantatoire » du problème du changement climatique (AYKUT, 2017), mobilisant « le grand récit

d'une planète "en transition" » au service d'objectifs consensuels. La gouvernance de la transition énergétique se trouve ainsi en pleine dissonance cognitive : alors que l'objectif des 2°C requiert déjà des efforts importants et semble difficile à concrétiser, un rapport sur les enjeux d'un objectif à 1,5°C est commandé. Cet exemple illustre à nouveau le schisme de réalité, décrit par AYKUT et DAHAN (2014b), entre les structures de gouvernance onusienne et la réalité du monde marquée par les luttes politiques, géopolitiques et économiques, entre l'immobilisme de la gouvernance et l'urgence de la situation.

Comment alors sortir de cette gouvernance incantatoire ? Les réponses à apporter à cette question sont complexes et ne se limitent pas à un aspect technique ou économique et doivent être alimentées par un ensemble de disciplines. La question énergétique se trouve en effet au cœur de plusieurs enjeux des sociétés humaines qu'ils soient sociaux, économiques, politiques ou encore géopolitiques. Les objectifs climatiques se trouvent ainsi profondément entremêlés avec des objectifs sociaux et politiques. Mais selon nous, une partie de la réponse peut résider dans la mise en œuvre d'outils permettant la transition énergétique. Nous proposons une contribution à cette réflexion en nous appuyant sur un outil de modélisation prospective permettant d'explorer les trajectoires d'évolution du système énergétique français et en explorant une approche originale du pilotage de la transition énergétique grâce à une analogie avec la physique des transitions de phase. Si nous nous concentrons principalement dans ce travail sur la transition du système énergétique qui reste indispensable pour répondre aux enjeux du réchauffement climatique, nous restons lucides sur le fait que la crise climatique en cours nécessite des modifications profondes du fonctionnement actuel de la société avec notamment une évolution vers des modes de vie plus sobres en énergie, ce qui nécessitera sûrement une transformation du contrat social pour répartir équitablement les efforts.

L'objet de ce travail s'articulera donc autour de l'analyse de la notion de transition énergétique, en s'appuyant sur le cas de la France et cherchera à apporter un nouvel éclairage sur la réalisation et le pilotage de la transition énergétique bas-carbone.

Dans la [Partie i](#), nous souhaitons dresser un état des lieux autour de la notion de transition énergétique. Dans le [chapitre 1](#), nous revenons tout d'abord sur son apparition et sa définition et montrons que l'expression de transition énergétique, qui recouvre différentes significations, diffère de la transition énergétique bas-carbone. Dans le [chapitre 2](#), nous analysons les principales transitions énergétiques qui se sont déroulées dans l'histoire afin de réfléchir aux conditions de son émergence, et nous montrons que, contrairement aux transitions passées, la transition énergétique bas-carbone doit être guidée.

Se pose alors la question du pilotage de la transition énergétique bas-carbone que nous explorons dans la [Partie ii](#) pour le cas de la

France. Dans le [chapitre 3](#), nous revenons sur l'évolution de sa politique énergétique depuis 1970 et les tentatives actuelles de mise en œuvre de la transition énergétique. Dans le [chapitre 4](#), nous proposons une critique de l'instrument économique habituellement proposé pour aider à réaliser cette transition énergétique. Grâce à un outil de prospective du système énergétique français, le modèle TIMES-France, nous évaluons le niveau de taxe associé à un objectif de neutralité carbone, explorons les transformations du système énergétique liées à différents objectifs de réductions des émissions, et apportons des éléments autour de l'importance des conditions initiales issus d'une comparaison avec la Suède.

Enfin, dans la [Partie iii](#), nous étudions de nouvelles approches du pilotage de la transition énergétique bas-carbone. Tout d'abord, dans le [chapitre 5](#), nous revenons sur les propositions apportées par le courant des *Sustainability Transitions* et soulignons les nombreuses limites qui rendent sa mise en œuvre difficile. Dans le [chapitre 6](#), nous revenons sur le concept de transition énergétique à travers la physique des transitions de phase. Une analogie entre les deux notions nous permet de proposer une nouvelle approche du pilotage de la transition énergétique.

## VALORISATION DU TRAVAIL DE THÈSE

---

Cette thèse a donné lieu à plusieurs travaux de valorisation :

### Publications

MILLOT, Ariane, Vincent MAZAURIC et Nadia MAÏZI (fév. 2019). « From Phase Transition to Energy Transition : What Can We Learn from Physics ? » Dans : *Energy Procedia*. Innovative Solutions for Energy Transitions 158, p. 3930-3936. ISSN : 1876-6102. DOI : [10.1016/j.egypro.2019.01.850](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.850).

MILLOT, Ariane, Rémy DOUDARD, Thomas Le GALLIC, François BRIENS, Edi ASSOUMOU et Nadia MAÏZI (2018). « France 2072 : Lifestyles at the Core of Carbon Neutrality Challenges ». Dans : *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C : Energy System Modelling and Policy Development*. T. 64. Lecture Notes in Energy. Cham, Switzerland : Springer, p. 173-190. ISBN : 978-3-319-74423-0. DOI : [10.1007/978-3-319-74424-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74424-7_11).

MILLOT, Ariane, Anna KROOK-RIEKKOLA et Nadia MAÏZI (soumis). « Guiding the Future Energy Transition to Net-Zero Emissions : Lessons from Exploring the Differences between France and Sweden ». Dans : *Energy Policy*.

MILLOT, Ariane et Nadia MAÏZI (p. d.[a]). « Challenges of Carbon Neutrality Goal in France ». *En préparation*.

– (p. d.[b]). « Lessons for the Low-Carbon Energy Transition : What Can We Learn from the Past ? » *En préparation*.

– (p. d.[c]). « Steering a Low-Carbon Energy Transition : What Can We Learn from Physics ? » *En préparation*.

### Conférences

MILLOT, Ariane, Anna KROOK-RIEKKOLA et Nadia MAÏZI (juin 2019). « Guiding the Future Energy Transition to Net-Zero Emissions : The Case of France and Sweden ». Dans : *IEW 2019 International Energy Workshop*. Paris, France.

MILLOT, Ariane, Vincent MAZAURIC et Nadia MAÏZI (mai 2019). « How to Steer an Energy Transition. A Heuristic Inspired from the Physics Concept of Phase Transition ». Dans : *2nd International Conference on Energy Research and Social Science*. Tempe, Arizona.

MAÏZI, Nadia, Ariane MILLOT et Vincent MAZAURIC (août 2018). « From Phase Transition to Energy Transition : What Can We Learn from Physics ? » Dans : *ICAE 2018*. Hong-Kong, China.

MILLOT, Ariane, Rémy DOUDARD, Thomas Le GALLIC, Edi ASSOUMOU, François BRIENS et Nadia MAÏZI (juil. 2017). « Carbon Neutrality Challenges for France in 2072 ». Dans : *IEW 2017 International Energy Workshop*. College Park, Maryland, USA.

MILLOT, Ariane (juil. 2017). « Evaluation of the French Energy Transition for Green Growth Law with Times-FR ». Dans : *71th Semi-Annual ETSAP Meeting*. College Park, Maryland, USA.

MILLOT, Ariane, Edi ASSOUMOU, François BRIENS, Rémy DOUDARD, Thomas Le GALLIC et Nadia MAÏZI (juil. 2016). « Towards a 1.5 Degree Compatible Energy System for France ». Dans : *EURO 2016 - 28th European Conference on Operational Research - Long Term Planning in Energy, Environment and Climate*. Poznan, Pologne.

### Séminaires

MILLOT, Ariane (déc. 2018). « Evaluation de trajectoires bas-carbone en France avec le modèle TIMES-FR ». Dans : *Journée de la Chaire MPDD 2018 - Du rôle de la modélisation prospective dans les processus de construction et d'évaluation des trajectoires nationales bas carbone*. Paris.

- (nov. 2017a). « Quels Impacts Des Objectifs de La LTECV Sur Le Système Énergétique Français ? » Dans : *Journée de La Chaire MPDD 2017 - Qu'en Est-Il Des Transitions Énergétiques à l'échelle Internationale ?* Paris.
- (avr. 2017b). « What Feasible Pathways to Carbon Neutrality in 2072 in France ». Dans : *Young Energy Economists and Engineers Seminar*. Nüremberg.
- (avr. 2017c). « Quelle Influence Des Politiques Publiques Sur La Transition Énergétique En France ? » Dans : *Journée Des Doctorants LEAT CMA 2017*. Sophia Antipolis.

MILLOT, Ariane, Thomas Le GALLIC et Rémy DOUDARD (déc. 2016). « Dessiner Une France Zéro Émission En 2072 Ou La Recherche de Combinaisons Vertueuses Entre La Place Des Énergies, Les Usages, Les Solutions de Flexibilité et Les Modes de Vie ». Dans : *Journée GRTgaz Chaire MPDD 2016 L'énergie et l'évolution de Nos Modes de Vie. Les Apports d'une Démarche Prospective*. Paris.

### Posters

- MILLOT, Ariane (sept. 2018a). « Transition de phase et transition énergétique : de l'analogie aux perspectives ». Dans : *10 ans de la Chaire MPDD*. Paris.
- (juil. 2018b). « Transition de phase et transition énergétique : de l'analogie aux perspectives ». Dans : *Mines ParisTech Research Day*. Paris.
  - (déc. 2016). « Du Déclenchement de La Transition Énergétique : Tentative de Formalisation ». Dans : *Journée GRTgaz Chaire MPDD 2016 L'énergie et l'évolution de Nos Modes de Vie. Les Apports d'une Démarche Prospective*. Paris.

Première partie

ÉTAT DES LIEUX DE LA TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE

## RETOUR SUR LE CONCEPT DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

---

*La transition écologique  
Le social, notion tragique*

— Jacques Perry-Salkow

La *transition énergétique* est un concept largement utilisé et toujours plus répandu ces dernières années. Pour s'interroger sur la transition énergétique vers un monde décarboné, ou transition énergétique bas-carbone, il est pertinent de se demander ce que recouvre cette notion.

L'expression de *transition énergétique* qui apparaît aujourd'hui consensuelle a émergé relativement récemment dans le débat public. Bien que l'on puisse retrouver des traces de son utilisation dès les années 1980, sa popularisation remonte au milieu des années 2000 avec la montée des préoccupations autour de la question du changement climatique. Si la majorité des experts, politiques, scientifiques, activistes ou lobbyistes s'accordent sur la nécessité d'une transition énergétique pour lutter contre le réchauffement climatique, peu d'acteurs convergent sur sa définition et de nombreuses questions restent en suspens. À quoi fait référence cette vision passe-partout et consensuelle ? En quoi consiste-t-elle exactement ? Comment la réaliser ? Qui seront les perdants de la transition ? Finalement, l'usage commun de cette notion ne consiste-t-il pas à dissimuler les décisions nécessaires à sa mise en œuvre ?

Dans ce chapitre, nous proposons de vous guider à travers l'émergence de ce concept ([section 1.1](#)) et la variété de ses définitions ([section 1.2](#)). Après avoir précisé sa déclinaison dans le cadre de la décarbonation ([section 1.3](#)) sur lequel nous concentrerons notre propos, nous proposons de visiter le courant précurseur des *Sustainability Transitions*, porteur d'une analyse pluridisciplinaire de la transition énergétique bas-carbone ([section 1.4](#)). Ces éléments nous conduiront naturellement à définir le cadre de notre contribution au décryptage et à la mise en œuvre d'une transition énergétique bas-carbone ([section 1.5](#)).

Alors qu'entend-on par transition ? Ce mot est utilisé aujourd'hui en association avec de nombreux phénomènes : transition démographique, sociale, numérique, énergétique, etc. Nous sommes rentrés dans « l'âge des transitions » (CHABOT, 2015). Cette déclinaison à tout va tend à confondre les deux conceptions qui s'y rattachent. En effet, un premier sens renvoie à la physique et au changement entre deux états définis ou connus tandis que le second se réfère à un passage graduel et progressif entre deux états et « se focalise sur le processus

de transformation » (MARESCA et DUJIN, 2014). C'est cette seconde acception, plus répandue, que l'on peut retrouver dans les définitions données par le Centre national de ressources textuelles et lexicales<sup>1</sup>. Lorsqu'il s'agit de transition énergétique, il est ainsi difficile de savoir à quoi l'on fait référence. Il nous paraît donc utile, avant de revenir sur sa définition, de retracer tout d'abord l'évolution de son utilisation.

### 1.1 APPARITION DE LA NOTION

La notion de *transition* est utilisée depuis longtemps, au-delà de son emploi par les physiciens dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (CURIE, 1895) (nous y reviendrons au chapitre 6). On la trouve par exemple dans le rapport *Limits to growth* (*Halte à la croissance?* en français, MEADOWS et al., 1972) qui met en garde contre l'épuisement des ressources dû à notre modèle de croissance économique. Pour éviter l'effondrement du système, les auteurs préconisent pour atteindre une situation d'équilibre, d'abandonner un modèle économique reposant sur la croissance et donc de réaliser une transition : « the transition from growth to global equilibrium » (MEADOWS et al., 1972, p.180).

Le concept de *transition* appliquée au système énergétique est popularisé un peu après, dans les années 1980 après le second choc pétrolier de 1979. À notre connaissance, la première référence à l'expression *energy transition* paraît dans un article de ATTIGA (1979) qui réfléchit à la situation des pays en développement. Par la suite, l'expression est reprise dans des rapports de l'*American Association for the Advancement of Science* (ABELSON, 1980; PERELMAN, GIEBELHAUS et YOKELL, 1981) qui s'intéressent principalement à la dépendance au pétrole et ses conséquences économiques et par la Banque Mondiale (CHENERY, 1981; WORLD BANK, 1983). Selon BONNEUIL et FRESSOZ (2013), l'expression *energy transition* est utilisée dès 1975 par des think tanks puis reprise par des lobbies industriels et diverses institutions comme le Bureau de la planification énergétique américain, le secrétariat suédois pour l'étude du futur, la Commission trilatérale (SAWHILL, 1978) ou encore la Communauté économique européenne afin d'éviter l'emploi du terme « crise » plus anxiogène.

Dans son usage, la notion de transition énergétique est aussi étroitement liée à celle de *développement durable*. Le rapport Brundtland *Notre avenir à tous* (BRUNDTLAND et al., 1987) qui cherche à proposer une alternative aux conclusions du rapport *Limits to Growth* préconise de changer notre mode de développement pour celui du développement durable qui « signifie la satisfaction des besoins élémentaires de tous et, pour chacun, la possibilité d'aspirer à une vie meilleure ». Pour changer de mode de développement, le rapport mentionne la transition vers le développement durable, « transition to sustainable development » ou encore une « transition to a safer, more sustainable

1. Voir [www.cnrtl.fr/definition/transition](http://www.cnrtl.fr/definition/transition)

energy era » (BRUNDTLAND et al., 1987). Il est à noter que les aspects énergétiques sont présents dans la conception de la transition puisqu'il est évoqué une « transition to a more diversified and balanced structure of energy supply and environmentally sound energy supply system ». Depuis la parution de ce rapport, c'est la notion de développement durable qui s'est imposée sur la scène internationale au détriment d'autres courants comme l'écodéveloppement (SACHS, 1980) et malgré les nombreuses critiques qui lui sont adressées (ZACCAI, 2015). L'adoption des *Sustainable Development Goals* au niveau international en 2015 comprend ainsi plusieurs indicateurs relatifs à l'énergie bien que la transition énergétique ne soit pas mentionnée directement.

La Figure 1.1 présente l'évolution du nombre de publications contenant les termes *energy transition* au sein de la base de données Scopus. On constate que l'utilisation de cette expression dans le champ académique est relativement récente, avec une expansion depuis le début des années 2000. Une recherche similaire pour la notion de *développement durable* montre que celle-ci prend son essor au début des années 1990.

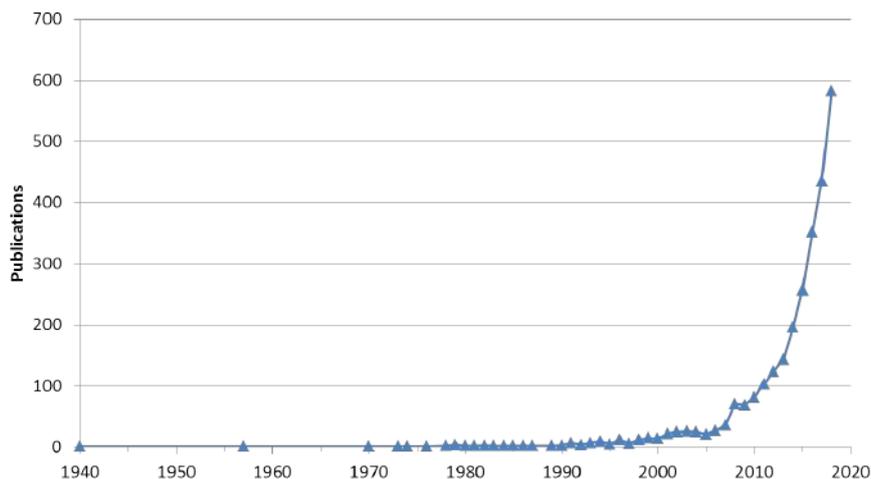


FIGURE 1.1 – Publications contenant les termes *energy transition*

Source : Base de données Scopus, recherche des termes « energy transition » dans *social sciences* et une partie de *physical sciences*<sup>2</sup>

En 1980 paraît en Allemagne le rapport *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran* (KRAUSE, BOSSEL et MÜLLER-REISSMANN, 1980) produit par l'Öko-Institut qui popularise la notion de transition énergétique, bien qu'*Energiewende* se traduise littéralement en français par *tournant énergétique*. L'idée de tournant peut toutefois sembler avoir, à première vue, un sens plus radical, plus proche de révolution que celui de transition qui renvoie dans le sens commun à un changement

2. Nous n'avons pas pris en compte une partie des revues relevant de la *physical science* comme les revues de physique pour éviter de comptabiliser la vaste littérature concernant les transitions de phase.

plus graduel et lent. S'opposant en partie aux thèses développées dans le rapport *Limits to Growth* paru en 1972 (MEADOWS et al., 1972), les auteurs KRAUSE, BOSSEL et MÜLLER-REISSMANN (1980) cherchent à montrer que la croissance économique est possible malgré une sortie du pétrole et du nucléaire. Un de leurs scénarios développés jusqu'à l'horizon 2030 propose une sortie de ces énergies tout en développant massivement les énergies renouvelables comme l'éolien et le photovoltaïque et en s'appuyant encore fortement sur le charbon (près de 55 % de ses besoins en énergie) (MORRIS et JUNGJOHANN, 2016). Leurs hypothèses reposent également sur une forte diminution de la demande d'énergie via notamment des actions d'efficacité énergétique mais sans remettre en cause les modes de vie (AYKUT et EVRARD, 2017).

La publication de ce rapport donne lieu à de nombreux débats en Allemagne où il est repris et commenté par les différentes parties prenantes. L'Öko-institut est ensuite invité à participer à diverses commissions pour réfléchir à l'évolution du système énergétique (AYKUT, 2015). Le discours autour de la transition énergétique ou *Energiewende* a donc rapidement su gagner les instances administratives et politiques avec un relatif accord sur sa définition. La popularisation de la notion de transition énergétique a été favorisée par les courants proches de la modernisation écologique<sup>3</sup> dont notamment les think tanks allemands. Le WBGU (Conseil consultatif scientifique sur le changement planétaire) publie notamment un rapport en 2011 présentant un « grand récit » de la transition (AYKUT et DAHAN, 2014b, Chap.11) : l'Allemagne et les autres pays européens pourraient entraîner le reste du monde dans une grande transition vers une économie bas-carbone. Derrière le discours autour de l'*Energiewende*, l'État allemand défend donc un véritable renouveau industriel appuyé par un programme politique partagé par de nombreux acteurs dont l'administration. L'institutionnalisation du tournant énergétique en Allemagne a donc commencé très tôt, en particulier par rapport à la France et s'est traduite par une « domestication » de sa transition, c'est-à-dire par l'établissement d'un projet industriel soutenu par l'État (AYKUT et EVRARD, 2017).

En France, l'expression *transition énergétique* apparaît bien plus tard et a été popularisée depuis une dizaine d'années, en même temps que la médiatisation des préoccupations envers le changement climatique. La première référence à la transition énergétique remonte, selon GUERRY (2016), à 2002 dans un rapport de presse sur une réunion des

---

3. Le discours de la modernisation écologique vise à intégrer les préoccupations environnementales au sein de l'économie de marché. L'environnement est vu potentiellement comme un nouveau porteur de projet du capitalisme, c'est le « nouveau moteur de la modernisation » (FOYER, 2015). L'idée du mouvement est donc que sous réserve d'inclure dans le calcul économique les dégradations environnementales, les institutions politiques, économiques et sociales n'ont pas besoin de changement structurel (AUDET, 2015). Les structures en place peuvent intégrer les problématiques de soutenabilité environnementale.

collectivités territoriales pour la protection de la planète. À partir de 2008, son utilisation se diffuse plus largement avec notamment son emploi dans un livre de ROJÉY (2008) sur les problématiques énergie-climat. Du côté institutionnel, le rapport BOISSIEU (2006) ne contient pas l'expression, mais celui de SYROTA (2008), deux ans plus tard fait plusieurs fois référence à une transition énergétique à l'horizon 2020-2030.

L'utilisation de l'expression est donc d'abord limitée avant de se diffuser plus largement à partir du milieu des années 2000. Comme l'ont remarqué AYKUT et EVRARD (2017), dans chacun des premiers rapports de l'association Négawatt (2003 et 2006) qui proposent des scénarios vers un système énergétique fonctionnant presque uniquement sur des renouvelables, l'expression *transition énergétique* n'est utilisée qu'une fois alors que le rapport publié en 2011 l'emploie à de nombreuses reprises (ASSOCIATION NÉGAWATT, 2011, environ une vingtaine de fois). La notion s'impose véritablement au sein du débat public dans les années 2010 avec notamment l'organisation du Débat national sur la transition énergétique (DNTE) en 2012 et 2013. L'émergence de la notion en France a donc lieu dans le contexte de la lutte contre le changement climatique avec la montée des préoccupations environnementales. La transition énergétique portée par le discours institutionnel est pensée principalement dans l'optique de la décarbonation ce qui permet de maintenir l'énergie nucléaire dans le mix énergétique. Elle s'oppose à celle portée par d'autres acteurs, principalement des outsiders du système, militants anti-nucléaires qui voient la transition énergétique comme une modification plus profonde du système avec notamment un changement des comportements et surtout une sortie du nucléaire (AYKUT et EVRARD, 2017).

L'institutionnalisation de la notion de *transition énergétique* (vue comme une composante de la *transition écologique*) est également marquée en France par la création du Conseil national de la transition écologique (CNTE) en 2012, la promulgation de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) en 2015 et l'élaboration de la Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (2015-2020). La multiplication des références aux notions similaires de *transition écologique* et de *développement durable* engendre du flou sur la vision du système vers lequel l'État français veut se diriger. Ces différentes options ne sont pas clairement tranchées comment en témoignent les atermoiements du gouvernement à chaque publication de documents stratégiques comme la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) ou la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). La transition française « orchestrée » (AYKUT et EVRARD, 2017) n'a pour l'instant permis qu'une appropriation consensuelle de la notion sans clarification du projet associé et n'a pas réussi à entraîner jusqu'à présent de véritable changement (nous y reviendrons en [Partie ii](#)).

## 1.2 TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : UN CONCEPT FLOU ET AMBIGU

L'utilisation à profusion du concept de *transition énergétique* n'empêche pas pour autant des débats autour de sa définition. La *transition énergétique* recouvre différentes significations qui varient beaucoup suivant les interlocuteurs. Par exemple, la vision d'un futur système énergétique reposant sur des nouvelles technologies révolutionnaires associé à une forte consommation d'énergie est incompatible avec celle d'un futur plus *low-tech* et sobre en énergie. Pour reprendre l'expression de DE PERTHUIS (2017), la transition est un « concept à géométrie variable ». Cette ambiguïté permet à chaque pays de proclamer qu'il est sur la bonne voie en matière de transition énergétique ou aux optimistes de penser que « la transition énergétique mondiale est en marche » (CANFIN, 2016). Cette absence de définition explicite pose problème car les objectifs auxquels la transition fait référence diffèrent. Elle peut ainsi prôner successivement la réduction des coûts des énergies pour favoriser la croissance économique, la décarbonation de l'énergie, un système énergétique plus résilient ou encore un changement complet de modèle social. Le consensus devient difficile à trouver même si pour certains il semble atteint. EVRARD (2014) parle ainsi de « consensus ambigu » en reprenant l'expression de Bruno Palier. CHAVANCE (1990) qui étudie la transition vers l'économie de marché note que « la notion de transition est à la fois indispensable et ambiguë pour penser le changement systémique », indispensable car elle permet de réfléchir à la recomposition du système mais ambiguë car elle suppose l'existence et la définition a priori d'un état final qui occulte les incertitudes.

Bien que l'on évoque généralement *la* transition énergétique à réaliser pour lutter contre le réchauffement climatique et bien qu'elle renvoie à des définitions différentes, nous pouvons dans un premier temps l'identifier simplement à un changement entre deux systèmes énergétiques. La transition énergétique ne signifie donc pas forcément décarboner un système énergétique mais simplement passer d'un système reposant majoritairement sur une source d'énergie primaire à une autre source d'énergie primaire. Avec la popularisation de cette expression, des événements qui auparavant n'étaient pas désignés comme tels ont été associés à cette notion. Ainsi, la révolution industrielle avec le développement de l'utilisation du charbon est devenue une transition énergétique entre un système fonctionnant majoritairement à partir de biomasse vers un système reposant en grande partie sur le charbon. Pourtant, le concept de révolution est différent de celui de transition comme l'a analysé CHABOT (2015). D'une part, la transition s'attache d'abord à modifier les moyens tandis que la révolution donne de l'importance aux objectifs finaux. D'autre part, le rapport au temps diffère : si la révolution cherche à revenir aux origines (temps cyclique), le temps de la transition correspond à une spirale, « cyclique

[mais] sans aucun retour à l'origine » (DE MEYER, 2015). Pour SMIL (2013) cependant, il est tout à fait pertinent de parler de transition et non pas de révolution, car la transition est un processus continu de changement : « Energy transitions are not sudden revolutionary advances that follow periods of prolonged stagnation, but rather continuously unfolding processes that gradually change the composition of sources used to generate heat, motion and light ».

En France, l'absence d'accord sur une définition précise de la transition énergétique a conduit à la poursuite d'objectifs incohérents comme la réduction de la part du nucléaire en 2025 concomitant avec la baisse des émissions de GES. Les débats autour de la question de la transition énergétique alimentent des visions contrastées du futur système énergétique, les principaux échanges se structurant autour de l'abandon de l'utilisation d'énergies fossiles et de la pertinence du passage à un système basé uniquement sur des énergies renouvelables. La question la plus conflictuelle est soulevée par la place à accorder à l'énergie nucléaire qui émet peu de CO<sub>2</sub> si on considère ses émissions en analyse de cycle de vie (BRUCKNER, BASHMAKOV et MULUGETTA, 2014) voire pas de CO<sub>2</sub> si on considère les émissions instantanées. Dans chaque vision du futur système énergétique, des variantes peuvent être explorées. Par exemple, les bioénergies sont considérées plus ou moins neutre en carbone en fonction de leur provenance et de leur gestion. Ainsi, leur utilisation à grande échelle ne serait pas forcément bénéfique en matière de bilan CO<sub>2</sub><sup>4</sup> (CHERUBINI et al., 2011) sans mentionner les conflits autour des ressources alimentaires (terres, produits agricoles, etc.) qui pourraient s'exacerber. Enfin, les fonctionnaires<sup>5</sup> de l'administration française du ministère de l'Écologie se réfèrent souvent à la LTECV adoptée en août 2015 pour définir le concept. Du côté institutionnel, la transition énergétique est donc une notion claire dans la mesure où la loi et les différentes stratégies nationales la déclinent le sont.

Souvent associé à la *transition énergétique*, le concept de *transition écologique* a émergé ces dernières années et est également de plus en plus utilisé. En témoigne le changement de nom du ministère français de l'écologie qui est devenu le ministère de la Transition écologique et solidaire en 2017 lors de l'arrivée de Nicolas Hulot au sein du gouvernement. Il n'est alors plus question uniquement de l'énergie mais de l'ensemble des êtres vivants et donc des écosystèmes de la planète. Cette notion globale propose de redéfinir les liens entre les différentes sphères de la société : sphère socio-économique et sphère du vivant. Des objectifs d'équité et de justice sociale viennent compléter l'objectif de décarbonation (JASANOFF, 2018). Cette transition

---

4. Si on considère généralement que la biomasse n'émet pas de CO<sub>2</sub>, sa combustion entraîne généralement l'émission de particules fines qui sont elles aussi sources de pollution locale.

5. Entretiens semi-directifs menés avec plusieurs fonctionnaires de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) entre 2016 et 2018

recherche une transformation plus globale des sociétés humaines et non pas uniquement du système énergétique. Cette approche de la transition, appréhendée dans une vision systémique se retrouve dans le mouvement des villes en transition, développé par Rob Hopkins. La transition est alors associée à l'idée de résilience et d'économie circulaire. En cherchant à proposer un changement aussi bien du système économique que de la société pour préserver l'environnement, le projet de *transition écologique* se rapproche de celui du *développement durable*, même si pour certains (Jacques Theys par exemple, voir BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015b) la dimension sociale est moins présente dans la *transition écologique*. Celle-ci tend d'ailleurs à remplacer le *développement durable* bien que les deux concepts soient tout aussi ambigus. Si avec cette notion, on souhaitait sortir de la confusion entourant le développement durable, elle a déjà été vidée de son sens et est « devenue une auberge espagnole » (BOURG et SCHMID, 2018).

Les concepts de *transition énergétique* ou de *transition écologique* n'ont pas de définition précise et, de la même façon que pour le développement durable (HOPWOOD, MELLOR et O'BRIEN, 2005), chacun peut y associer sa vision du système énergétique futur ou de la société dans son ensemble. Le flou entourant la transition énergétique a donc l'avantage, pour de nombreux promoteurs du concept, de faire passer implicitement l'idée qu'il n'y aura pas besoin de changer de modèle de société (BOURG et SCHMID, 2018). Pour RUMPALA (2010), l'énonciation de la transition alimente un « discours de conviction » qui prétend ainsi faire exister cette transformation. AYKUT, EVRARD et TOPÇU (2017) soulignent également l'ambivalence de l'utilisation de la notion de transition énergétique, vu plutôt comme un « outil de maintien » du régime de l'existant. En effet, en évitant d'explicitier sa définition, on ne discute pas des implications d'une transition énergétique aussi bien du point de vue technique que social. Pour reprendre AUDET (2015), les débats actuels « font une place croissante à l'idée de transition à laquelle on accole un grand nombre de suffixes qui renvoient à des projets politiques variés et potentiellement contradictoires : transition vers l'économie verte ou vers l'économie sobre en carbone, transition énergétique ou transition écologique, transition juste, etc. ». Un « imaginaire de la transition » se met ainsi en place (FRESCOZ, 2014), au service de différents discours programmatiques visant à « convaincre les acteurs socio-économiques et les entrepreneurs que la transition est en cours, qu'elle est facile, qu'on sait la conduire » (DAHAN, 2018), que c'est un chemin inéluctable.

Pour étudier le concept de transition énergétique, il est donc important de préciser sa définition. Le [Tableau 1.1](#) présente un extrait représentatif des visions relevées dans la littérature liée aux transitions énergétiques : histoire, sciences économiques et sciences sociales. Ce dernier domaine se réfère spécifiquement au courant des *Sustainability transitions* que nous présenterons dans la [section 1.4](#). Les définitions

proposées ont donc souvent tendance à se focaliser sur les processus techniques (production, transformation et approvisionnement d'énergie) en négligeant les aspects sociaux liés à l'énergie comme les modèles d'accès ou de consommation (SHOVE et WALKER, 2007; PEARSON, 2018). Pour PEARSON (2018), « energy transitions can involve shifts in how, where and by whom energy is extracted, produced, transformed, supplied, accessed and used. They can unfold at global, regional, national, local or sectoral scales ». Une transition énergétique est donc souvent associée à des processus d'évolution de la société. Comme le font remarquer AYKUT, EVRARD et TOPÇU (2017), « la transition énergétique demeure encore largement sous-théorisée par les sciences sociales » et est généralement définie comme le « passage entre deux états supposés stables », en supposant implicitement l'existence d'un sens de l'histoire (AYKUT et EVRARD, 2017) ce qui apparaît problématique. En effet, comme nous le verrons dans le chapitre 2, la transition du système énergétique n'advient pas spontanément et n'est pas un processus inéluctable mais une histoire à construire dans un environnement plus vaste comprenant d'autres problématiques socio-économiques.

### 1.3 DÉLIMITATION DU CONCEPT DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE

Au-delà de la transition énergétique, les objectifs de la transition énergétique bas-carbone ne sont pas non plus clairement définis et cette absence de définition pose problème. Les acteurs ont l'impression d'atteindre un consensus : les tribunes médiatiques appelant à un sursaut dans la lutte contre le changement climatique (COLLECTIF, 2018), ou proclamant que la transition énergétique a déjà lieu (ROGER et BARROUX, 2016) sont légions. Mais sans définition précise, il est facile de s'accorder sur la nécessité de faire une transition énergétique. D'autant plus que tout devient prétexte à mener la transition énergétique : nombre de projets de recherche sont menés au nom de la transition énergétique même si le lien est parfois ténu. Le concept serait presque devenu un objet marketing à invoquer pour obtenir des financements ou susciter l'intérêt, illustrant ainsi le phénomène abondamment commenté de *greenwashing*.

Les derniers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2007, 2014, 2018b) ont montré que la réduction des émissions de GES devait commencer le plus rapidement possible. Une transition énergétique bas-carbone consiste donc a minima à diminuer ces émissions du système énergétique. Afin de faciliter cette transition, il est possible de l'inclure dans un projet plus vaste, celui de la transition écologique qui inclut d'autres objectifs environnementaux et socio-économiques. Ces autres objectifs ne sont

TABLE 1.1 – Définitions de la transition énergétique selon divers auteurs

DÉFINITION	SOURCE
A transition is usefully defined as a change in the state of an energy system as opposed to a change in an individual energy technology or fuel source. [...] Market shares reaching pre-specified thresholds are typically used to characterize the speed of transition (e.g. coal versus traditional biomass).	GRUBLER, WILSON et NEMET (2016)
A change in fuels (e.g., from wood to coal or coal to oil) and their associated technologies (e.g., from steam engines to internal combustion engines). [But there are] other relevant types of energy transitions, such as the potential switch from centralized to decentralized electricity production [...], from little access to energy resources among low-income groups to widespread availability among all social classes.	HIRSH et JONES (2014)
Shifts in the fuel source for energy production and the technologies used to exploit that fuel [or] significant transformations in socio-energy systems.	MILLER, RICHTER et O'LEARY (2015)
A particularly significant set of changes to the patterns of energy use in a society, potentially affecting resources, carriers, converters, and services.	O'CONNOR (2010)
The switch from an economic system dependent on one or a series of energy sources and technologies to another.	FOUQUET et PEARSON (2012)
The change in the composition (structure) of primary energy supply, the gradual shift from a specific pattern of energy provision to a new state of an energy system.	SMIL (2010b)
L'ensemble des transformations requises pour significativement modifier les usages finaux, le mix des sources primaires et la chaîne de transformation/stockage/distribution d'un système énergétique.	DE PERTHUIS et SOLIER (2018)
La transition ne se réduit pas à de simples développements techniques [...]. Un système énergétique est la combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en œuvre de sources d'énergie déterminées et par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux, lesquels se développent et se renforcent sur la base de ce contrôle.	DEBEIR, DELÉAGE et HÉMERY (2013)
Energy transitions entail wide-ranging and longlasting shifts from one socio-technical regime to another, resulting in the establishment of a new socio-technical system.	SCHOT, KANGER et VERBONG (2016)

Source : adaptée de SOVACOOOL (2016).

pas obligatoirement subordonnés à la réduction des émissions<sup>6</sup>. Ils peuvent ainsi consister en une amélioration de l'emploi, de la richesse, du bien-être, de l'acceptabilité sociale, etc., et peuvent s'appuyer sur les co-bénéfices qu'apporteraient cette transition énergétique. Toutefois, la plupart des autres objectifs résultent de compromis politique (démocratie, équité, diminution de la précarité énergétique, inégalités, etc.) qui ne sont pas l'objet de notre analyse. Pour parvenir à réduire les émissions, il est légitime de se demander si une transformation plus profonde des structures sociales est nécessaire et donc de considérer qu'il est nécessaire d'inclure d'autres objectifs pour réaliser une transition énergétique. Mais si on se limite aux exigences de la lutte contre le réchauffement climatique, l'objectif principal reste la diminution des émissions de GES. Des objectifs comme le maintien de la biodiversité ou socio-économiques comme les *Sustainable Development Goals* peuvent offrir des synergies intéressantes pour s'adapter et/ou lutter contre le réchauffement climatique. Cependant, nous faisons le choix de nous limiter dans un premier temps à cet objectif de diminution des émissions de GES pour la transition énergétique bas-carbone.

Si l'on s'accorde sur un objectif de réduction des émissions, les questions suivantes se posent alors : jusqu'où les réduire ? Et à quelle vitesse ? Avant l'accord de Paris, l'objectif discuté dans les instances internationales était celui de 2°C<sup>7</sup>. Le grand changement apporté par l'accord de Paris est le nouvel enjeu associé à la valeur de 1,5°C car l'article 2 stipule de contenir « l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels » et de s'efforcer de « limiter l'élévation de la température à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels ». Le dernier rapport du GIEC sur le *Global warming of 1,5°C* (IPCC, 2018a) a montré que la vitesse de la transition du système énergétique doit être particulièrement rapide pour pouvoir espérer respecter cet objectif puisque les émissions mondiales doivent atteindre la neutralité en 2050, en général grâce à l'aide d'émissions négatives (voir Figure 1.2). Cet objectif semble bien compliqué à réaliser (RAFTERY et al., 2017), pour ne pas dire irréaliste, et s'inscrit dans la veine des objectifs annoncés toujours plus ambitieux mais jamais respectés. Ce point de vue rejoint celui d'Oliver Geden et son analyse du *targetism* des politiques climatiques actuelles (GEDEN, 2015). Depuis la montée des préoccupations envers le climat dans les années 1990, il a toujours été « minuit moins cinq » pour agir. La fenêtre d'action toujours réduite s'est décalée dans le temps au fur et à mesure des années pour laisser une marge de manœuvre au politique. Pour améliorer la lisibilité de l'action politique, Oliver Geden propose de se limiter à un objectif d'atteinte de la neutralité carbone pour chaque pays (GEDEN, 2016). Le choix de

6. En Allemagne, les deux objectifs de sortie du nucléaire et de réduction des émissions sont ainsi mis sur un pied d'égalité.

7. Pour la construction de cet objectif, voir AYKUT et DAHAN (2011) et AYKUT et DAHAN (Chap.7, 2014b).

l'objectif est donc finalement lui aussi sujet à discussion : objectif de température, objectif traduit en concentration de CO<sub>2</sub> ppm, objectif de budgets carbone, objectif sur le niveau des émissions comme le propose Oliver Geden ou encore objectif sur l'empreinte écologique comme le suggère Dominique Bourg. L'objectif d'une transition énergétique visant une réduction des émissions peut donc avoir plusieurs modalités. En pratique, la plupart des pays s'accordent aujourd'hui sur des cibles de réduction des émissions de GES par rapport à une année de référence ou à un scénario de référence.

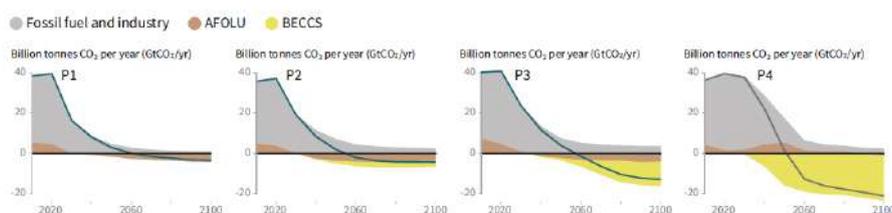


FIGURE 1.2 – Quatre trajectoires mondiales d'émissions CO<sub>2</sub> pour atteindre l'objectif 1,5°C

Source : IPCC (2018a)

En France, la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) définit un ensemble d'objectifs qui ont d'ors et déjà été reportés ou modifiés pour plusieurs d'entre eux. La mention de la croissance verte reflète bien le mouvement d'économicisation de l'environnement dénoncé par certains (AYKUT et DAHAN, 2014a ; MARIS, 2014 ; FEYDEL et BONNEUIL, 2015)<sup>8</sup>. Cette croissance verte permettrait de rester sur le chemin de la croissance économique, la croissance du PIB en particulier auquel les politiques sont très attachés, tout en diminuant nos émissions CO<sub>2</sub>, et en étant indépendant énergétiquement. Ces objectifs rejoignent ceux définis par le triangle du développement durable : compétitivité, durabilité, et indépendance énergétique. Les objectifs définis dans la LTECV sont donc subordonnés à ceux de l'économie classique. Cette notion s'inscrit en plein dans la modernisation écologique. Ce cadrage de la question de la transition énergétique s'apparente à un refus de penser une « vraie » transition énergétique qui impliquerait un changement de société ou du moins de s'interroger sur les objectifs de cette transition au-delà des aspects énergétiques et économiques.

La notion recouvre une multiplicité de définitions et demeure généralement ambiguë. Apparaissant comment nouveau paradigme du développement durable, il reste en effet à prouver son effectivité. Dans sa mise en œuvre, les débats restent pour une large part nationaux, chaque État décidant des politiques à mener. En Europe, bien que des

8. Voir LEVREL et MISSEMER (2016) pour une discussion autour de l'économicisation de la nature.

objectifs ambitieux soient affichés comme la neutralité carbone en 2050, la Commission européenne a du mal à harmoniser l'ensemble des politiques nationales et à impulser une transition qui reste toujours floue. Si la mise en œuvre de la transition énergétique a débuté dans certains pays dont la France, elle « doit encore faire la preuve de son opérationnalité » (BOISSONADE, 2017).

#### 1.4 LES TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES VUES PAR LES SUSTAINABILITY TRANSITIONS

Plusieurs approches conceptuelles ont été développées pour étudier les transitions énergétiques. SOVACOOOL (2016) en distingue quatre relevant de différentes disciplines. Le courant reposant sur la théorie de la modernisation écologique que nous avons déjà partiellement évoqué considère que la transition énergétique est l'occasion d'un mouvement de modernisation plus général. Il se concentre principalement sur les institutions et les industries (HAJER, 1995; BUTTEL, 2000; MOL et SPAARGAREN, 2000; BECK, BONSS et LAU, 2003). Issu de la sociologie et de l'anthropologie, le courant *social practice theory* se focalise sur les routines cognitives et les structures sociales (LUTZENHISER, 1993; SHOVE et WALKER, 2010; WALKER, 2014). L'écologie politique provenant des sciences géographiques et politiques se concentre sur les difficultés de la société à sortir du paradigme néo-libéral qui empêche l'émergence de nouvelles solutions (HARVEY, 2003; ROBBINS, 2011). En réalité, son thème de prédilection porte donc plus sur les conflits autour des ressources naturelles et les causes politiques, sociales et économiques des dégradations environnementales que sur les transitions du système énergétique. Enfin, le courant des *Sustainability Transitions* sur lequel nous nous pencherons étudie les transitions socio-techniques avec un focus sur les innovations permettant de réaliser une transition durable (GEELS et SCHOT, 2007; LOORBACH, 2007; KERN, 2012). Il a concentré son analyse sur le phénomène de transition et c'est pour cette raison que nous proposons d'approfondir ses propositions dans ce qui suit. Nous pouvons également ajouter un autre courant issu de l'histoire, représenté entre autres par Smil (nous y reviendrons dans le [chapitre 2](#)) qui s'est lui aussi focalisé sur ce processus de transition en portant une attention particulière aux analyses quantitatives et aux substitutions technologiques mais en limitant l'étude des facteurs sociaux et politiques.

##### 1.4.1 *Les Sustainability Transitions : une approche pluridisciplinaire de la transition*

Dans les années 2000, un nouveau courant de recherche dénommé *Sustainability Transitions* ou *Transition Studies* apparaît à la croisée des sciences politiques, de la sociologie de l'innovation et des études

de gestion avec pour but d'étudier les transitions socio-techniques et de proposer des moyens de les guider et de les gouverner. Né aux Pays-Bas et au Royaume-Uni autour des chercheurs Frank Geels, René Kemp, Johan Schot ou encore Derk Loorbach, la communauté grandit rapidement et se structure autour d'un réseau de recherche, le Sustainability Transitions Research Network qui regroupe aujourd'hui plus de 1 500 chercheurs<sup>9</sup>. Dans le monde francophone cependant, peu de chercheurs<sup>10</sup> se sont emparés de cette approche. Ce courant produit aujourd'hui une vaste littérature sur le concept de transition.

La transition d'un système socio-technique est définie comme « un processus de transformation au cours duquel un système passe d'un régime d'équilibre à un autre » (BOULANGER, 2008). Les *Sustainability Transitions* doivent permettre d'aller vers des modes de production et de consommation plus durables. Selon MARKARD, RAVEN et TRUFFER (2012), « sustainability transitions are long-term, multi-dimensional, and fundamental transformation processes through which established socio-technical systems shift to more sustainable modes of production and consumption ». Les recherches portent donc à la fois sur la compréhension des mécanismes théoriques sous-jacents à la transition d'un système, sur l'analyse des transitions passées ou actuelles et sur la gestion de la gouvernance des transitions.

De plus, le champ de recherche des *Sustainability Transitions* puise sa source dans de nombreux domaines et cherche à promouvoir la pluridisciplinarité en utilisant les différents courants le constituant. Les sujets de recherche concernent principalement les études des transitions historiques avec notamment l'analyse des succès ou des échecs de nouvelles technologies (GEELS, 2005; BENNETT, 2012), le management de la transition (*Transition Management*) – c'est-à-dire la gestion de la transition avec l'analyse du rôle des politiques et des différents acteurs (BOSMAN, LOORBACH et al., 2014) ainsi que les stratégies à mettre en place –, l'analyse des mouvements sociaux avec les initiatives locales (SEYFANG et HAXELTINE, 2012), et enfin les études géographiques à l'échelle urbaine par exemple (ERNST et al., 2016; DEBIZET et al., 2016). Le courant porte une attention particulière sur le rôle des politiques, sur les conflits entre les intérêts des acteurs historiques et ceux des nouveaux entrants (perdants contre gagnants d'une transition), sur les incertitudes liées à la transition, sur le contexte particulier d'une transition et sur les différentes dimensions de la transition, en particulier les interactions entre les différents niveaux du *Multi-Level Perspective (MLP)* sur lequel nous reviendrons en sous-section 1.4.2 de ce chapitre.

Comme le souligne AUDET (2015), « les concepts de réflexivité et de complexité sont au cœur des théories de la transition et du champ des *sustainability transitions* ». En effet, le courant cherche à se démarquer

9. D'après leur site <https://transitionsnetwork.org>, consulté le 05/11/2018.

10. On peut citer Paul-Marie Boulanger ou René Audet.

de la modernisation écologique en insistant sur la nécessité d’avoir une gouvernance réflexive. Celle-ci permet d’adopter une démarche critique vis-à-vis des moyens déployés pour gouverner la transition, d’être capable de changer ses pratiques ainsi que de prendre en compte les effets négatifs des solutions déployées. Pour Voss et KEMP (2006, p.4), la gouvernance réflexive nécessite de remettre en cause les fondations de la gouvernance, c’est-à-dire les concepts, les pratiques et les institutions qui gouvernent le développement de la société. Le courant s’inspire également de la théorie des systèmes complexes (*systems thinking*) qui étudie les liens et les interactions non-linéaires entre les différents composants d’un système ou encore les phénomènes d’auto-organisation. Utilisée dans plusieurs domaines de recherche (sociologie, économie, écologie, sciences politiques), elle est également reprise dans le champ des *Sustainability Transitions* pour prendre en compte les incertitudes et les processus non-linéaires de changements et d’innovations qui ont lieu au niveau de la société et pour définir la transition (LOORBACH, 2010).

#### 1.4.2 Un cadre théorique d’analyse de la transition

Dans le champ des *Sustainability Transitions*, la transition est définie comme « a gradual, continuous process of change where the structural character of a society (or a complex sub-system of society) transforms » (ROTMANS, KEMP et VAN ASSELT, 2001) bien que certaines de ces caractéristiques soient non-linéaires. La transition qui s’étend sur une ou deux générations comprend quatre phases (voir Figure 1.3) :

- le pré-développement : phase d’équilibre dynamique où les changements ne sont pas encore visibles
- le décollage : l’état du système commence à se modifier
- l’accélération : des changements structurels visibles apparaissent suite à une accumulation de changements socio-culturels, économiques, écologiques et institutionnels qui se renforcent les uns les autres.
- la stabilisation : la vitesse de changement décroît et une nouvelle phase d’équilibre dynamique est atteinte.

La transition est caractérisée par trois indicateurs : la vitesse de son changement, l’importance (ou la taille) de cette transformation, et la période temporelle correspondant à son évolution.

La transition n’est pas provoquée par le changement d’une variable associée à l’apparition d’une technologie ou la variation d’un prix mais est plutôt le résultat d’interactions multiples entre des développements qui ont lieu dans différents domaines : technologique, économique, comportemental, culturel, etc. (KEMP et LOORBACH, 2006). Ces développements correspondent en fait à des innovations systémiques. Selon KEMP et LOORBACH (2006), « transitions can thus be seen as a cascade

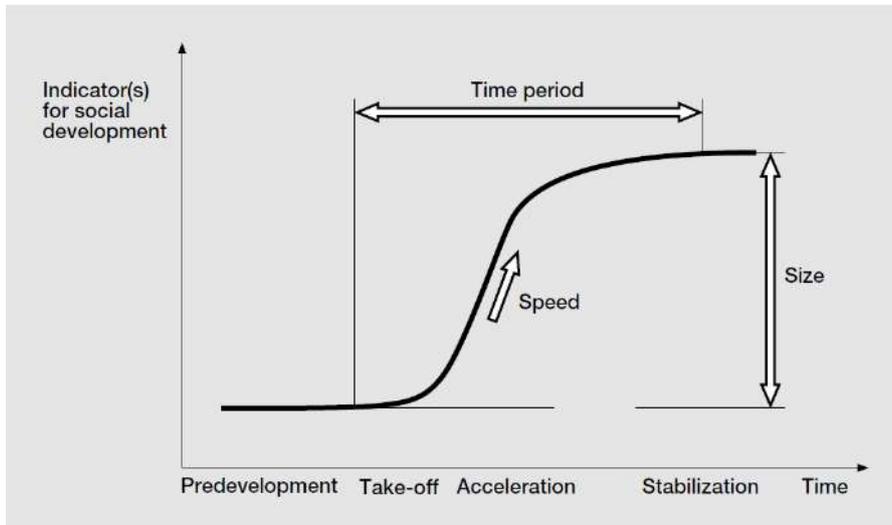


FIGURE 1.3 – Les quatre phases d’une transition

Source : adapté de ROTMANS, KEMP et VAN ASSELT (2001)

of innovations at different levels and at different speeds ». Tiré des *Innovations Studies*, un cadre d’analyse a été développé pour analyser ces évolutions. La transition est provoquée par des interactions entre les différents niveaux de ce qu’on appelle le *Multi-Level Perspective (MLP)* (GEELS, 2002). Le MLP a été développé entre autres par Kemp, Rip et Schot (KEMP, RIP et SCHOT, 2001) et correspond à trois niveaux d’analyse illustrés dans la Figure 1.4 :

- *Niche innovations* : le niveau micro où les innovations émergent. Les niches permettent la protection de ces nouveautés contre la sélection du marché trop précoce<sup>11</sup>.
- *Sociotechnical regime* : le régime ou système socio-technique qui comprend l’activité coordonnée de différents groupes partageant les mêmes routines cognitives et règles pour guider leur comportement.
- *Sociotechnical landscape* : l’environnement exogène ou le paysage qui fait subir des pressions aux autres acteurs (des niches ou du régime socio-technique) qui doivent s’y adapter.

Dans ce cadre, la transition est définie comme le processus de changement entre des régimes socio-techniques (GEELS et SCHOT, 2007) et est le résultat d’interactions entre des changements et des innovations qui se produisent dans ces différents niveaux : « slowly changing trends lead to new ways of thinking (paradigms) that lead to innovation and vice versa » (KEMP et LOORBACH, 2006).

11. Une innovation peut ne pas être rentable et compétitive lors des premières années de sa mise sur le marché. Le libre marché peut alors conduire à la sortie de ces innovations de l’économie.

Increasing structuration  
of activities in local practices

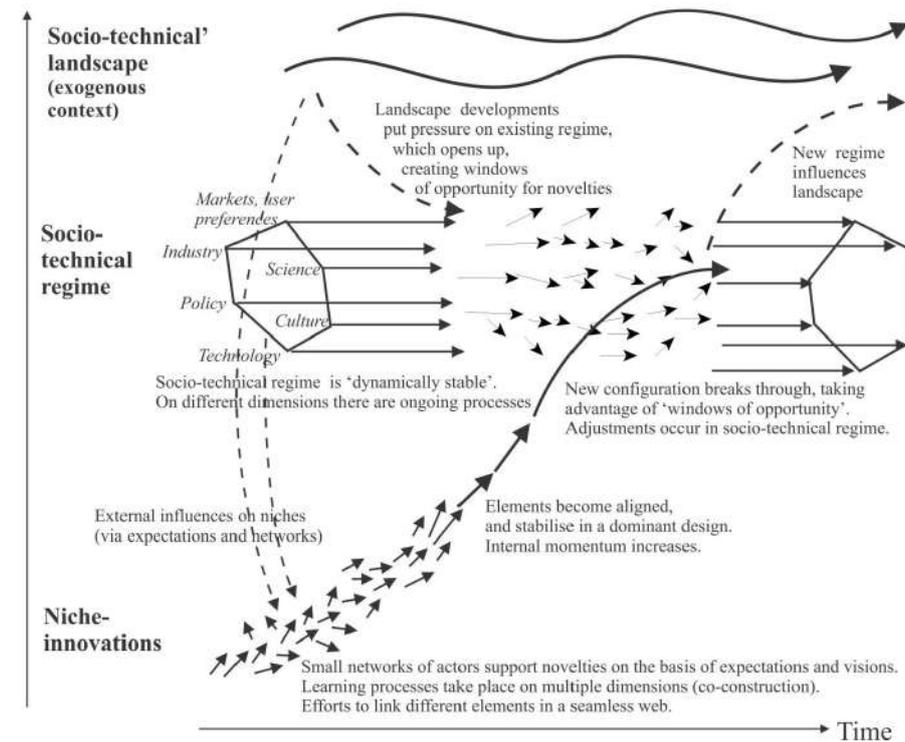


FIGURE 1.4 – Le *Multi-Level Perspective* sur les transitions

Source : GEELS et SCHOT (2007)

Le système, ou régime, socio-technique correspond à un ensemble formé par des infrastructures, des technologies, des acteurs et des groupes sociaux qui partagent les mêmes routines cognitives et obéissent aux mêmes règles. Un système socio-technique correspond donc à des « assemblages d'artefacts, de règles et de normes, de pratiques et de marchés, d'organisations, d'infrastructures, de réseaux, de systèmes de maintenance et de significations culturelles » (BOULANGER, 2008). Parmi les acteurs du régime, AUDET (2015) cite en exemple « les instances gouvernementales, les centres de recherches et de développement, les entreprises et associations industrielles, les corporations professionnelles, etc. ».

Les routines cognitives « renvoient aux systèmes de croyance et de représentations qui fondent les manières de faire dans les domaines techniques » (AUDET, 2015). Les autres règles renvoient à la régulation, émanant du droit ou encore aux règles normatives. D'un point de vue technologique, les acteurs font également consensus sur les problèmes importants et la façon de les aborder, sur les préférences des utilisateurs, sur l'organisation du système et sur leur rôle (ARENTSEN, KEMP et LUITEN, 2002). Ce système de valeur est partagé par les acteurs dominants du régime et fonde les stratégies des industries et des organisations du régime ainsi que les politiques des institutions. Les

acteurs et les différentes organisations du régime partagent donc les mêmes préférences et leurs modes de vie s'adaptent au fonctionnement du régime. Les technologies du système et ses infrastructures sont construites suivant les mêmes standards et les mêmes régulations techniques.

Toutes ces relations structurent le fonctionnement du régime et définissent le développement de ce système. En effet, un régime socio-technique peut légèrement se modifier sous l'influence d'innovations incrémentales développées par des acteurs du système, par exemple grâce à la compétition entre les entreprises qui fait émerger des innovations améliorant la performance ou le fonctionnement du régime. Celui-ci n'est donc pas immuable ni statique, son état est dynamiquement stable. En effet, les innovations adoptées s'inscrivent dans le cadre établi du système socio-technique et ne représentent pas un changement de régime. Son fonctionnement général, les valeurs sous-jacentes, les réseaux d'acteurs ne seront pas fondamentalement modifiés. Les relations entre acteurs, les règles auxquels ils obéissent, les routines cognitives qu'ils partagent perdurent. Le fonctionnement du régime est donc caractérisé par une forte inertie, le régime tend naturellement à se reproduire plutôt qu'à innover (KEMP et LOORBACH, 2006). Pour aller vers un système plus « soutenable » ou durable, les innovations incrémentales ne suffisent pas, la structure et les règles du régime socio-technique doivent être modifiées ce qui correspond à une transition. Celle-ci renvoie donc à un processus de transformation d'un état d'équilibre dynamique à un autre.

La notion de transition entre régimes socio-techniques permet de souligner les différentes dimensions qui vont être impactées par le changement : les institutions, les infrastructures, les industries, les marchés, etc. La transition est toujours « un processus multiniveaux, multiacteurs, multiphase et coévolutif » (AUDET, 2015). Les transitions dépendent en effet de beaucoup de facteurs politiques, institutionnels, culturels, techniques, scientifiques ou encore économiques.

### 1.4.3 Les chemins de transition

En s'appuyant sur le paradigme d'analyse du MLP, GEELS et SCHOT (2007) établissent une typologie<sup>12</sup> des chemins de transitions résumée

12. Bien que la typologie développée par GEELS et SCHOT (2007) soit la plus utilisée, d'autres classifications de transition ont été développées (HAXELTINE et al., 2008). Elles prennent toutes en compte l'importance de la dynamique des interactions entre les différents niveaux du MLP ainsi que celle du timing des interactions et sont donc assez similaires. C'est pourquoi nous présenterons uniquement celle de GEELS et SCHOT (2007). Au sein du courant des *Sustainability transitions*, MARKARD, RAVEN et TRUFFER (2012) distinguent d'autres paradigmes en plus du MLP : le *Strategic Niche Management* (SCHOT et GEELS, 2008), le *Transition Management* (voir chapitre 5) et les *Technological innovation systems* (MARKARD, HEKKERT et JACOBSSON, 2015) qui cherchent à analyser et comprendre la dynamique d'un système d'innovation centré sur une technologie spécifique.

dans la [Figure 1.4](#). Les innovations sont fondamentales pour transformer le régime socio-technique. De manière générale, une transition se déroule de la façon suivante : des innovations apparaissent au niveau des niches ; des évolutions au niveau du paysage (*landscape*) exercent de la pression sur le régime ; les tensions dans le régime permettent de créer une fenêtre d'opportunité pour l'émergence d'innovations ; l'expansion des innovations reconfigure le régime. Comme expliqué précédemment, un régime socio-technique reste à l'équilibre de manière dynamique : sans interactions particulières, des innovations incrémentales émergent et entraînent de petites reconfigurations du régime. La nature des interactions entre les différents niveaux du MLP (choc spécifique, turbulente, sur une ou plusieurs dimensions - disruptif ou avalanche) et leurs déroulements définissent quatre types de transition présentés dans le [Tableau 1.2](#).

Si l'innovation est un instrument clé pour faire advenir une transition, il faut bien distinguer les innovations incrémentales des innovations systémiques. Les innovations incrémentales conduisent à une optimisation du système existant tandis que les innovations systémiques permettent de satisfaire des besoins de la société d'une nouvelle manière. Celles-ci peuvent se produire au terme d'une série d'innovations incrémentales mais entraînent finalement la reconfiguration du régime et l'adoption de nouveaux principes, règles et routine (ARENTSEN, KEMP et LUITEN, 2002). Un exemple d'innovation incrémentale dans le secteur du transport est celui des autoroutes intelligentes pour l'optimisation du système alors qu'un système d'auto-partage complet représente une innovation systémique.

La typologie de transition décrite n'est pas un cadre fixe dans lequel les transitions doivent obligatoirement s'inscrire. Les chemins de transition peuvent se transformer de l'un à l'autre suivant la pression exercée au niveau du paysage (*landscape*). Ainsi, le changement climatique pourrait déclencher une suite des différents chemins de transition exposés dans le [Tableau 1.2](#) (GEELS et SCHOT, 2007), en particulier dans les systèmes socio-techniques associés à l'énergie et au transport. Par extension, on pourrait imaginer différents types de transition dans chacun des sous-systèmes socio-techniques qui amènent à une plus grande reconfiguration du système socio-technique principal.

#### 1.4.4 Spécificité de la transition bas-carbone

L'étude des transitions socio-techniques reposant sur le MLP peut se faire dans différents secteurs comme le transport terrestre ou l'industrie du charbon (GEELS, 2005 ; TURNHEIM et GEELS, 2013), elle peut porter sur des transitions passées (GEELS, KERN et al., 2016) ou actuelles (BOSMAN, LOORBACH et al., 2014 ; VERBONG et GEELS, 2007). L'analyse se focalise donc généralement sur un seul secteur. Or la transition écologique attendue devrait impliquer de multiples transi-

TABLE 1.2 – Les quatre types de transition d’après GEELS et SCHOT (2007)

NOM	DESCRIPTION	EXEMPLE
<i>Transformation path</i>	Un changement au niveau du paysage exerce une pression légère sur le régime à un moment où les innovations de niche ne sont pas suffisamment développées. Les acteurs du régime vont modifier la direction du chemin de développement et les activités d’innovation. Ces innovations s’ajoutent au régime existant et ne modifient pas son architecture de base.	Transition aux Pays-Bas des fosses septiques aux égouts
<i>Dealignment and realignment path</i>	Des changements soudains et nombreux (en avalanche) au niveau du paysage augmentent les problèmes du régime ce qui conduit les acteurs à perdre foi en celui-ci. Cela conduit à un désalignement et une érosion du régime. Si les innovations ne sont pas suffisamment développées, de multiples innovations vont coexister et entrer en compétition. Une de ces innovations va finalement devenir dominante et former le cœur du réalignement du nouveau régime.	Transition aux États-Unis des voitures à cheval aux voitures automobiles
<i>Technological substitution</i>	La pression provenant du paysage est très importante (choc spécifique, changement en avalanche ou disruptif) et se produit à un moment où les innovations sont suffisamment développées. Celles-ci émergent et modifient le régime.	Transition au Royaume-Uni des bateaux à voile aux bateaux à vapeur
<i>Reconfiguration pathway</i>	Des innovations symbiotiques sont initialement adoptées par le régime pour résoudre des problèmes locaux. Elles déclenchent par la suite des ajustements dans l’architecture de base du régime. La transition n’est pas provoquée par l’émergence d’une technologie mais par la séquence de multiples innovations.	Transition aux États-Unis de la production artisanale à la production de masse

tions dans tous les secteurs. Dans le *Transition Management* sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 5, les cas d'applications se limitent généralement à un secteur particulier. La mise en place d'une telle analyse ou d'une gestion de la transition sur l'ensemble des secteurs composant un régime socio-technique apparaît difficile d'autant plus qu'il peut y avoir des liens entre les différents secteurs d'un régime.

Des tentatives d'application des concepts précédents à la spécificité de la transition bas-carbone ont toutefois été envisagées. Ainsi, un nouvel axe de recherche initié par GEELS, BERKHOUT et VAN VUUREN (2016) et TURNHEIM, BERKHOUT et al. (2015) cherche à promouvoir la pluridisciplinarité dans l'étude des transitions bas-carbone (*low-carbon transitions*). Ils proposent d'utiliser un ensemble de pratiques prospectives, les analyses socio-techniques tirés des *Sustainability Transitions*, les IAM (*Integrated Assessment Model*) pour l'aspect modélisation et les *initiative-based learning* ou *practice-based action research* pour traiter des actions locales. Cette combinaison devrait permettre de mieux cerner les différentes dimensions de la gouvernance, en particulier les systèmes de gouvernance polycentrique et de répondre aux différents besoins des politiques en nourrissant la réflexion sur l'évolution du régime socio-technique et sa gouvernance. Les discours qualitatifs développés dans ces visions peuvent être validés à travers des modèles ou d'autres approches analytiques (GEELS, BERKHOUT et VAN VUUREN, 2016). En outre, les transitions bas-carbones ne concernent pas uniquement des aspects technologiques mais également des changements de comportement des consommateurs, des marchés, des institutions, des infrastructures et plus généralement du système de valeur sous-jacent. Ces différentes dimensions qui interagissent entre elles et évoluent ensemble sont difficiles à intégrer dans des modèles mathématiques mais sont prises en compte par les approches socio-techniques.

Cette tentative de combiner les approches quantitatives et qualitatives (VAN SLUISVELD et al., 2018; GEELS, McMEEKIN et PFLUGER, 2018; McDOWALL, 2014) reste toutefois délicate à mettre en œuvre car la transition est un processus particulièrement complexe. McDOWALL et GEELS (2016) mettent ainsi en garde contre le risque d'un cadre d'analyse unique et surplombant basé sur une tentative d'intégration trop poussée entre les approches qualitatives et les modèles. Ils prônent de conserver une pluralité d'approche sans chercher à construire un cadre d'analyse unique et surplombant en misant sur les apports de chaque discipline pour permettre de mieux envisager la transition énergétique bas-carbone.

## 1.5 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DE LA THÈSE

C'est autour de cette notion de transition énergétique, ambiguë et floue que s'inscrit cette contribution.

Employée en France et dans le monde par beaucoup de politiques et de parties prenantes sans clarifier les objectifs qui lui sont associés, elle semble faire office de vœu pieux : appeler uniquement à la transition n'est pas suffisant pour la déclencher. Et appeler à une transition sans préciser l'état final vers lequel nous souhaitons aller ne permet pas de déclencher une transition compatible avec les objectifs de décarbonation. Nous sommes donc dans une situation de « consensus ambigu » où tout le monde s'accorde pour faire une transition énergétique sans en préciser ni les tenants ni les aboutissants.

Une revue de la variété des définitions qui sont associées à la transition énergétique reflète les approches conceptuelles utilisées et nous a permis de prendre la mesure des enjeux associés et des opportunités dont veulent se saisir les promoteurs. Pour le futur, il n'existe d'ailleurs pas *une* transition énergétique mais *des* transitions énergétiques qui dépendent de chaque contexte social, politique, culturel, géographique, énergétique, etc.

Comme exemple de question non tranchée autour des objectifs de la transition énergétique, revenons sur la question des limites. Posé entre autres dans le rapport *Limits to Growth* (MEADOWS et al., 1972) qui montre que la croissance devra faire face à des limites, ce constat est remis en cause par les partisans de la croissance verte. Ce paradigme repose sur l'idée qu'avec la richesse apportée par la croissance, plus de ressources et donc des investissements pourront être consacrés à la lutte contre le changement climatique et à la protection de l'environnement (voir par ex. les travaux de Nordhaus). Ainsi, si l'expression de transition énergétique est mentionnée sans spécifier ses objectifs, la trajectoire associée et ses impacts, elle peut conduire à des dénouements radicalement opposés.

Pour THEYS (2017), deux approches de la transition énergétique se distinguent : l'une considère que la transition est « un passage, un entre-deux, une période d'instabilité et de tâtonnements entre deux phases de stabilité », l'autre que la transition est « un chemin ou une mise en mouvement vers un changement désiré - avec un horizon qui est défini a priori ». La démarche prospective est alors utile pour concilier les deux approches et en particulier éclairer les objectifs de la transition bas-carbone.

Dans ce travail, il nous faut clarifier l'ensemble des éléments qui, comme nous l'avons vu, sont incontournables pour débattre de la transition énergétique. Et en premier lieu, ce que nous souhaitons signifier par *transition énergétique* et *transition énergétique bas-carbone*.

Pour la *transition énergétique*, nous pouvons reprendre la définition de SMIL (2010b) : la transition énergétique est définie par un changement de structure du système énergétique<sup>13</sup>, lorsqu'une source

---

13. « Un système énergétique est un ensemble complexe défini à trois niveaux : un certain mix d'énergies primaires mobilisées, leur transformation par des forces

d'énergie dominant l'approvisionnement en énergie primaire est modifiée.

Quant à la *transition énergétique bas-carbone*, elle sera définie par un changement de structure du système énergétique accompagné d'une réduction des émissions CO<sub>2</sub>. Si d'autres objectifs comme la sortie du nucléaire peuvent faire partie d'une transition, ils seront motivés par d'autres préoccupations qui sortent de notre champ d'étude<sup>14</sup>. La *transition énergétique bas-carbone* se distingue donc de la *transition énergétique* puisqu'elle ne se limite pas à un changement de source énergétique et car elle vise avant tout à décarboner le système énergétique.

En se démarquant de la transition écologique qui comprend d'autres objectifs sociaux et politiques, nous nous restreignons en effet au système énergétique<sup>15</sup> qui est le principal émetteur d'émissions de GES. Comme l'a montré POTTIER (2014, chap. 6), les problèmes entourant la définition du périmètre des émissions à prendre en compte pour la lutte contre le changement climatique est un débat essentiellement politique, et la justification de la définition de la frontière de calcul des émissions CO<sub>2</sub> est une « construction sociale » que nous laissons donc de côté. La justification que nous pouvons apporter est la suivante : les émissions de GES liées au système énergétique représentent près de 80 % du total. Pour celui-ci (nous mettons de côté sciemment les émissions liées au système agricole bien qu'il y ait des liens avec le système énergétique), les émissions sont principalement dues à la combustion des énergies fossiles. Elles sont bien les principales responsables du réchauffement climatique que nous connaissons aujourd'hui et ce sont donc elles qu'il va falloir éliminer de notre système énergétique. Nous laissons donc de côté des problématiques importantes comme le nucléaire et ses déchets.

Le cadre et les objectifs étant fixés, la question qui reste entière est celle de la réalisation de cette transition énergétique bas-carbone. Pour cela, nous proposons d'explorer les transitions énergétiques qui se sont déroulées dans le passé dans le [chapitre 2](#). Cette analyse ré-

---

motrices dominantes (prime movers) et des modes d'utilisation finale, le tout étant soutenu par un jeu d'infrastructures matérielles et immatérielles présentant une grande inertie dans le temps » d'après DE PERTHUIS (2017) qui s'inspire de SMIL (2010b).

14. Peut-être faut-il insister sur le fait que nous ne nous prononçons pas sur la validité ou non de cet objectif.

15. Nous souhaitons cependant souligner encore une fois, que la transition énergétique bas-carbone est un problème de démocratie. La définition de ses objectifs doit passer par une discussion entre citoyens et ne pas se cantonner au cercle des experts. Les avantages et inconvénients des différentes trajectoires doivent être présentés pour effectuer un choix éclairé (voir XEXAKIS et TRUTNEVYTE, 2019, pour la manière d'informer de façon optimale les citoyens). Il y a donc des aspects sociaux et politiques qu'il ne nous appartient pas de traiter mais dont il faut reconnaître l'importance (ces aspects sont d'ailleurs soulignés dans la définition adoptée par le courant des *Sustainability transitions*).

trospective permettra de mettre en avant les caractéristiques de ces transformations ainsi que leurs moteurs et les conditions de leur émergence. En particulier, nous montrerons que l'objectif de décarbonation de la transition énergétique bas-carbone nécessite un pilotage précis, en boucle fermée.

Si le pilotage de la transition est nécessaire, comment alors le mettre en place ? Dans la [Partie ii](#), nous présenterons les tentatives de pilotage de la transition énergétique en France. Jusqu'à présent, les transitions énergétiques qui se sont déroulées ont été pilotées en boucle ouverte. Par ailleurs, la mise en œuvre d'une transition énergétique bas-carbone n'a commencé que timidement et ne semble pas être pleinement réalisée ni cohérente (voir [chapitre 3](#)). Enfin, le pilotage de la transition énergétique vers un monde décarboné est confronté à de nombreux défis (voir [chapitre 4](#)). Ainsi, l'outil classique de pilotage proposé par les économistes est la taxe carbone. Cependant, l'objectif fixé par l'accord de Paris de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C et même de s'efforcer à la limiter à 1,5°C conduit à des niveaux de taxe très élevés qui seront très difficiles à mettre en place pour des questions d'acceptabilité sociale et d'équité. Le pilotage ne pourra donc pas se faire avec les outils classiques.

Dans la dernière partie ([Partie iii](#)), nous aborderons donc les nouvelles approches du pilotage de la transition énergétique. Tout d'abord, le [chapitre 5](#) revient sur les propositions de gestion de la gouvernance des transitions socio-techniques par le mouvement des *Sustainability Transitions* et les limites de cette méthode. Et finalement, dans le [chapitre 6](#), nous présentons une nouvelle approche de la transition énergétique grâce aux outils conceptuels tirés de la théorie des transitions de phase en physique. Cette analogie entre les deux concepts nous permettra de proposer un nouveau pilotage très fin du processus de transition énergétique, à travers un ensemble de politiques et mesures évoluant dans le temps.

## QUE NOUS ENSEIGNE L'HISTOIRE ?

---

*La révolution industrielle,  
nourrit la solitude en ville.*

— Jacques Perry-Salkow

Les sciences humaines sont essentielles pour comprendre la transition énergétique, phénomène complexe englobant plusieurs dimensions : sociale, technique et économique. Un système énergétique possède en particulier une dimension culturelle qu'il ne faut pas négliger comme en témoignent, par exemple, les réactions contrastées qu'a suscitées la catastrophe de Fukushima au niveau mondial. Aussi, l'attention particulière portée par les historiens au contexte social apporte des perspectives nouvelles à la compréhension du système énergétique (HIRSH et JONES, 2014). Il nous semble donc opportun de regarder la contribution que ces mêmes historiens peuvent apporter à l'étude des transitions énergétiques. Pour reprendre la phrase de Marguerite Yourcenar<sup>1</sup> : « Le coup d'Œil sur l'Histoire, le recul vers une période passée ou, comme aurait dit Racine, vers un pays éloigné, vous donne des perspectives sur votre époque et vous permet d'y penser davantage, d'y voir davantage les problèmes qui sont les mêmes ou les problèmes qui diffèrent ou les solutions à y apporter ». Si le futur ne peut être prédit par l'étude de l'histoire, il nous semble important de comprendre comment se sont déroulées les transitions énergétiques dans le passé. De leur observation, nous tenterons de dégager leurs caractéristiques communes et leurs différences. En particulier nous nous interrogerons sur les moteurs de ces évolutions, leurs similitudes et leurs particularités.

Évidemment, les enjeux entre les transitions passées et la transition que nous souhaiterions accomplir ne sont pas les mêmes, mais l'analyse rétrospective nous permettra de mieux comprendre le défi que représente la transition à mener et d'identifier les aspects prépondérants pour l'avenir. Ce point de vue rejoint celui de HIRSH et JONES (2014) pour qui il serait faux de croire que l'histoire se répète. La transition bas-carbone ne se résumera pas à une nouvelle révolution industrielle et les enseignements des événements passés ne seront pas forcément réutilisables tels quels (PEARSON et FOXON, 2012). Si les analogies avec le passé sont donc à prendre avec précaution, elles devraient toutefois nourrir la réflexion prospective car « the employment of analogies may help identify previously neglected factors and

1. Générique qui ouvre l'émission hebdomadaire *Concordance des temps* de Jean-Noël Jeanneney sur France culture.

highlight the existence and significance of forgotten considerations, stakeholders, and institutions » (HIRSH et JONES, 2014). L'histoire permet ainsi de comprendre la situation actuelle, comment les changements ont été provoqués mais également comment ils pourraient se dérouler dans le futur. L'observation et l'analyse des changements passés sert à reconsidérer certains facteurs qui pourraient jouer un rôle dans les futures transitions, et en particulier dans la transition bas-carbone.

L'énergie a été un élément déterminant dans l'évolution des sociétés humaines. Les historiens ont d'abord principalement travaillé sur la maîtrise de l'énergie sous l'angle de l'analyse des techniques. L'histoire des techniques est un domaine qui émerge au début du 20<sup>ème</sup> siècle entre les deux guerres. Par exemple, BLOCH (1935) étudie comment l'amélioration des moulins a entraîné la diffusion de leur utilisation dans des domaines variés (moulins foulons, moulins papiers). Les historiens se sont également penchés sur la révolution industrielle qui est née de l'exploitation d'une nouvelle source d'énergie, le charbon. En 1932, l'historien de l'économie NEF (1932) détaille dans son livre *The Rise of the British Coal Industry* comment le charbon a remplacé l'utilisation du bois dans l'industrie britannique au cours des 16<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> siècles. Ces premiers travaux ont servi de référence même si leurs conclusions seront corrigées par des études ultérieures (MASSARD-GUILBAUD, 2018)<sup>2</sup>. Cependant, durant le 20<sup>ème</sup> siècle, peu d'historiens ont abordé la question de l'énergie d'un point de vue global, en analysant le système énergétique à travers ses relations avec l'utilisation de l'énergie, ses transformations et ses conséquences sur l'organisation de la société.

Avec la montée des enjeux climatiques sur la scène internationale, depuis les années 1980, les historiens ont consacré plus spécifiquement leurs études à l'histoire de l'énergie mais l'analyse des transitions énergétiques en tant que telle est restée un champ émergent. Rejoignant l'observation de ARAÚJO (2014), nous avons remarqué que les premiers chercheurs à s'être intéressés aux transitions énergétiques sont issus pour la plupart de l'économie (comme Nakicenovic) ou des sciences naturelles (comme Smil). La plupart des études réalisées sur les transitions énergétiques sont de fait rattachées à l'histoire de l'économie : on peut citer par exemple les historiens Robert Allen ou Roger Fouquet. En économie, les tout premiers travaux remontent au 19<sup>ème</sup> siècle et portent sur la question des ressources. L'ouvrage *The Coal Question* (JEVONS, 1866) analyse ainsi la chaîne d'innovation technique ayant abouti à la révolution industrielle en Angleterre. La communauté des économistes s'est par la suite interrogée sur les liens entre croissance

---

2. Pour Nef, l'épuisement des forêts a conduit à l'utilisation du charbon en Angleterre ce qui a été remis en cause dès les années 1950 par HAMMERSLEY (1957) et FLINN M.A (1959). La chronologie proposée par Bloch concernant l'utilisation des moulins à eaux a été corrigée par les archéologues spécialistes de l'antiquité (MASSARD-GUILBAUD, 2018).

économique et technique (SOLOW, 1957)<sup>3</sup> et plus particulièrement, sur le statut des énergies fossiles en tant que facteur de production ainsi que sur la façon optimale d'exploiter une ressource (HOTELLING, 1931). Cependant, de manière générale, la question des ressources ne joue pas un rôle important dans l'économie néo-classique et ce jusqu'aux années 1970 (POTTIER, 2014, Chap.2). Après la parution du rapport du club de Rome (MEADOWS et al., 1972) qui déclenche dans le milieu de l'économie de virulents débats autour de la croissance, les questions liées à l'énergie sont réservées aux économistes spécialistes en ressources avec l'émergence du domaine de l'économie de l'énergie. L'histoire de l'économie s'est donc naturellement interrogée sur l'évolution de la prise en compte des facteurs énergétiques dans la discipline économique puis sur les raisons de l'émergence de la révolution industrielle. Il s'avère qu'il s'agit d'une des transitions énergétiques les plus étudiées comme nous allons le voir en sous-section 2.1.2 de ce chapitre, au sens de la définition donnée par SMIL (2010b) : « The change in the composition (structure) of primary energy supply, the gradual shift from a specific pattern of energy provision to a new state of an energy system ».

À travers la rétrospective que nous proposons des événements observés dans le passé, nous allons à présent analyser les conditions et les moteurs de ce que les historiens nomment désormais transition énergétique. Les caractéristiques de ces changements pourront apporter, comme nous l'avons défendu, des éléments de compréhension aux enjeux de la transition énergétique bas-carbone.

## 2.1 RETOUR HISTORIQUE SUR LES TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES

L'énergie a été essentielle au développement des sociétés humaines et a apporté, pour reprendre le titre du livre de KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), de la puissance aux Hommes (*Power to the people*). Toutes les activités humaines nécessitent de l'énergie qui provient soit de l'alimentation (transformée à travers l'humain ou la domestication d'animaux d'élevage), soit de la transformation d'énergies naturelles ou fossiles. Pour SMIL (1994, p.1), « from the perspective of natural science, both prehistoric human evolution and the course of history may be seen fundamentally as the quest for controlling greater energy stores and flows ». Il ne s'agit pas ici de considérer que l'évolution des civilisations a été uniquement guidée par la recherche d'un plus grand approvisionnement en énergie<sup>4</sup>, mais de souligner la place importante de cet élément parmi les facteurs explicatifs du développe-

3. Solow considérait toutefois que les ressources en tant que telles n'étaient pas indispensables pour la croissance économique (SOLOW, 1974).

4. L'anthropologue Marshall Sahlins a par exemple montré dans ses travaux que les sociétés primitives de chasseurs-cueilleurs ne vivaient pas dans une situation de dénuement mais plutôt d'abondance et ne cherchaient donc pas à augmenter leur consommation d'énergie.

ment humain. La recherche de la maîtrise de l'énergie et l'abondance énergétique ont ainsi profondément changé le fonctionnement des sociétés. L'augmentation de la consommation d'énergie grâce au charbon lors de la révolution industrielle a par exemple restructuré le pouvoir politique (MITCHELL, 2011).

### 2.1.1 Une rétrospective de long terme

#### *Transitions et révolutions énergétiques*

La maîtrise du feu il y a plus de 400 000 ans (DE LUMLEY, 2006) marque un tournant dans notre évolution : les humains peuvent mieux conserver leur nourriture, fabriquer des outils, se réchauffer ou encore éloigner des prédateurs. Cette première révolution énergétique<sup>5</sup> n'est peut-être pas stricto sensu une transition énergétique mais elle marque une première rupture dans l'utilisation de l'énergie qui auparavant ne reposait que sur les apports caloriques. L'innovation de la cuisson apportée par le feu aurait permis au cerveau de l'humain de croître (HERCULANO-HOUZEL, 2016)<sup>6</sup>. Avec la chaleur dégagée par le feu, les humains ne dépendent plus du soleil pour leurs activités et résistent mieux au froid. Il leur est alors possible de s'étendre géographiquement. L'énergie liée à la maîtrise du feu a donc été un élément déterminant pour l'évolution de l'Homo Sapiens.

Faisons un saut dans le temps et remontons au 12<sup>ème</sup> millénaire avant notre ère. Dans les sociétés néolithiques, l'invention de l'agriculture permet d'augmenter de nouveau les apports caloriques (ARNOUX, 2015a). En s'affranchissant des aléas de la cueillette, de la chasse et de la pêche, ces premiers agriculteurs étendent leurs ressources alimentaires entraînant une croissance démographique importante et la diffusion des différentes techniques agricoles. L'utilisation de la traction animale améliore encore par la suite les rendements de l'agriculture. La société de chasseurs-cueilleurs laisse place à une société constituée de communautés plus grandes où le pouvoir est plus concentré. En effet, l'organisation de la société se modifie avec l'émergence de classes dévolues à l'artisanat, au commerce et à l'armée avec une centralisation du pouvoir (HASSAN, 1979). Dans le même temps, la population totale mondiale augmente considérablement.

---

5. Nous employons cette expression dans le sens de changement brutal et soudain : la maîtrise du feu marque l'apparition de systèmes énergétiques ne se limitant plus à l'alimentation. Dans cette perspective, elle ne renvoie pas à une modification d'un système énergétique et donc à une transition énergétique. Le système énergétique désigne les sources d'énergie primaire, leurs transformations et consommations par un ensemble de convertisseurs et d'infrastructures nécessaires pour satisfaire des services énergétiques.

6. Cette hypothèse est remise en cause par ceux qui considèrent que c'est l'apport de protéines animales qui est à l'origine du développement du cerveau (MILTON, 1999). Il n'en demeure pas moins que le feu a été une première étape dans la maîtrise de l'énergie.

Il s'agit de la première des trois transitions que la plupart des historiens comme WILSON et GRUBLER (2011) distinguent, à savoir, la révolution agraire, la 1<sup>ère</sup> révolution industrielle à laquelle succède la 2<sup>nde</sup> révolution industrielle. D'autres historiens comme SMIL (2010b) ou KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) considèrent qu'il y a eu une transition supplémentaire à partir des années 1970 grâce aux technologies de l'information et de la communication qualifiée parfois de 3<sup>ème</sup> révolution industrielle.

Ces différentes transitions (exceptée la révolution agraire) sont visibles sur la Figure 2.1 qui présente l'évolution de la part relative des différentes énergies dans la consommation mondiale d'énergie primaire. La Figure 2.2, quant à elle, montre que l'histoire de l'énergie n'est pas uniquement une histoire de transitions mais principalement d'« additions énergétiques » (FREZZOZ, 2014). La caractéristique principale des transitions énergétiques passées au niveau mondial est en effet l'augmentation de la consommation d'énergie (FOUQUET, 2016a). À la biomasse sont venus s'ajouter le charbon au 19<sup>ème</sup> siècle, puis le pétrole au début du 20<sup>ème</sup> siècle suivis par le gaz, l'énergie hydraulique, le nucléaire et plus récemment les énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien.

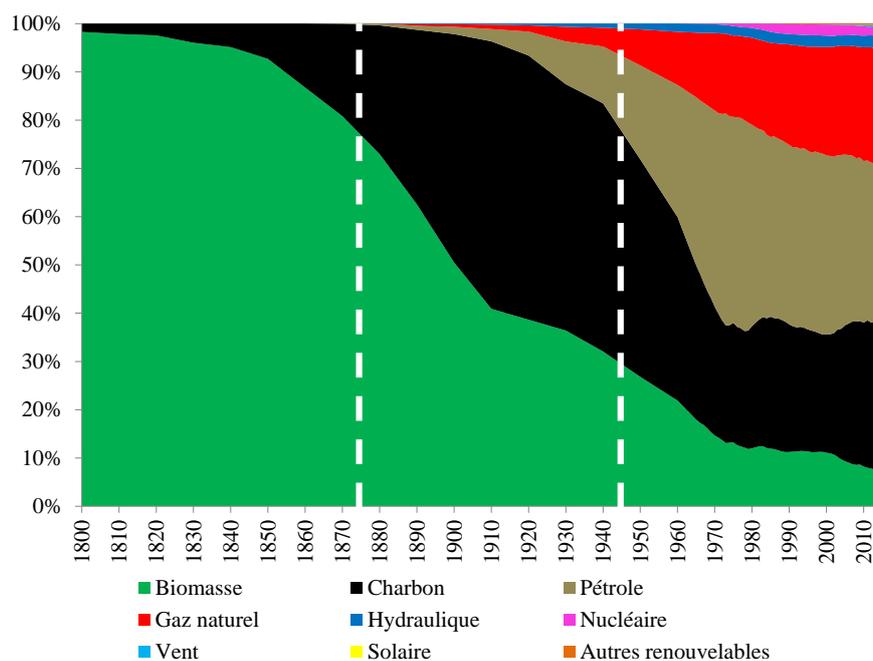


FIGURE 2.1 – Évolution de la consommation énergétique primaire au niveau mondial en %

Remarque : la première ligne pointillée indique le moment où le charbon dépasse pour la première fois les 25 % du total de la consommation énergétique primaire, la deuxième renvoie au pétrole et au gaz.

Source : SMIL (2017) & BP Statistical Review of World Energy, récupéré sur <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>

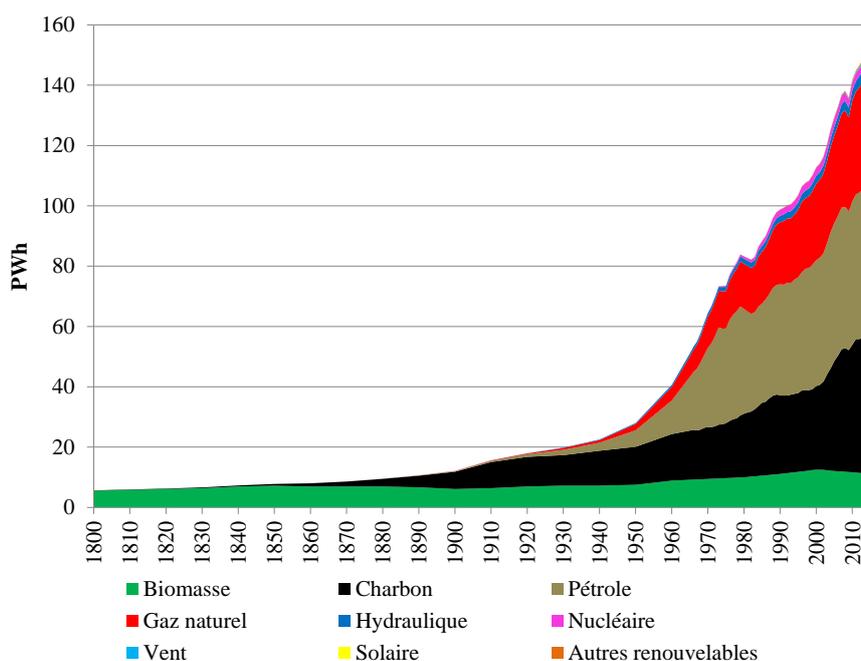


FIGURE 2.2 – Évolution de la consommation énergétique primaire au niveau mondial

Source : SMIL (2017) & BP Statistical Review of World Energy, récupéré sur <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>

Si le terme de transition est maintenant couramment employé pour désigner ces périodes, on parla pendant longtemps de révolution. L'emploi du terme de transition est d'ailleurs critiqué par BONNEUIL et FRESSOZ (2013) pour qui « la notion de transition empêche de voir la persistance des systèmes anciens et [...] surestime les déterminants techniques au détriment des arbitrages économiques ». Pour SOVACOO (2016), « transitions are mostly "cumulative rather than fully substitutive" ». Si les transitions passées résultent certes de phénomènes d'accumulation, il ne faut pas ignorer les mécanismes de substitution qui se sont également produits. Le concept de transition désigne donc principalement, dans ce cas, les bouleversements engendrés par ces changements de la nature des approvisionnements énergétiques. Pour ARNOUX (2015b), « on peut interpréter comme autant de transitions énergétiques les innovations technologiques successives qui permirent d'accroître à la fois la productivité des cultures (diffusion du cheval de trait, amélioration des charrues, introduction de nouveaux assolements, nouveaux modes de stockages du grain) et la production de fer et d'acier, dans un espace contraint ». Enfin, ces transitions ne sont pas des périodes de l'histoire où les sociétés ont décidé de changer d'approvisionnement énergétique et auraient piloté ou dirigé un tel changement. Les développements des infrastructures, des technologies ont été guidés au contraire par des questions de croissance économique, de profit, d'indépendance ou d'amélioration des services

énergétiques. Les boucles de rétroaction n'existaient que très rarement, de sorte que l'on peut conclure que le pilotage de ces transitions a été réalisé en boucle ouverte.

Jusqu'à la révolution industrielle, pratiquement la totalité de l'énergie utilisée provenait de la biomasse elle-même issue de l'agriculture et de la forêt. Le système énergétique était caractérisé par la prédominance des énergies renouvelables dont le niveau de production suivait les cycles du climat (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013, Chap.3). Les périodes climatiques chaudes étaient favorables au développement des sociétés humaines avec l'expansion de l'agriculture tandis que les périodes plus froides correspondaient à un déclin démographique. Au Moyen-Âge, la diffusion des moulins à eau et des moulins à vent permettent d'apporter de la puissance dans l'utilisation de l'énergie. Si, en ce qui concerne l'énergie produite<sup>7</sup>, cet apport n'est pas particulièrement notable, la puissance installée permet entre autres la disparition du recours aux esclaves dans les sociétés européennes (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). L'ordre de grandeur de ces puissances reste toutefois très bas par rapport à ce que nous connaissons aujourd'hui. Un moulin à vent fournit ainsi une puissance maximale de 10 chevaux tandis qu'une machine à vapeur de 1900 fournit jusqu'à 10 000 chevaux. Bien que ce sujet fasse encore débat chez les historiens (MASSARD-GUILBAUD, 2018), il semblerait que l'invention de la machine à vapeur par Watt en 1769 soit intervenue au moment où la société contrainte par la disponibilité en biomasse était arrivée à une sorte de point de rupture qui rendait inévitable le recours à de nouvelles sources d'énergies.

Ainsi, au début du 19<sup>ème</sup> siècle a lieu la première révolution industrielle qui correspond à une transition de la biomasse vers le charbon. La machine à vapeur ainsi que plusieurs innovations techniques dans le domaine de la métallurgie entraînent un bouleversement profond du secteur du transport avec l'apparition des chemins de fer. Bien que le charbon soit l'emblème du 19<sup>ème</sup> siècle, il ne prendra une part significative (supérieure à 25 %) dans le mix énergétique mondial qu'à la toute fin du siècle, vers 1880.

La 2<sup>ème</sup> révolution industrielle se déroule au 20<sup>ème</sup> siècle et correspond à une transition vers le pétrole et l'électricité. Deux groupes d'innovations techniques entraînent des changements majeurs dans tous les secteurs : un centré autour du pétrole avec le développement du moteur à combustion interne associé à l'émergence d'une industrie automobile et un autre lié à la production d'électricité avec son utilisation dans l'éclairage puis dans l'industrie.

---

7. Un moulin à vent pouvait produire 60 kWh/jour soit l'équivalent du travail de 100 hommes tandis qu'un moulin à eau d'une puissance de 2 chevaux pouvait produire 18 kWh/jour soit le travail de 30 hommes. Au total, l'énergie produite représentait environ 2 % de la consommation totale.

*Transition d'une économie organique*

En reprenant l'analyse présentée dans KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), nous pouvons donc distinguer plusieurs phases au cours de l'histoire de l'utilisation de l'énergie par les humains depuis la Renaissance :

- 1500-1800 : la consommation d'énergie repose essentiellement sur les ressources en biomasse<sup>8</sup>. Les ressources sont rares et la croissance qui a lieu dans des pays comme l'Angleterre ou les Pays-Bas est une exception.
- 1800-1970 : la consommation d'énergie augmente considérablement grâce à l'apport de nouvelles sources énergétiques, c'est l'âge industriel. L'industrialisation n'a pas lieu au même moment dans tous les pays ni à la même vitesse. Le charbon a été un élément clé pour le déclenchement de cette croissance moderne.
- 1970-2008 : bien que la consommation d'énergie totale continue de croître, la consommation par habitant se stabilise. Cette période est marquée par des innovations dans les technologies de l'information et de la communication comme le transistor. Elles permettent à l'industrie lourde de réaliser des économies d'énergie tandis qu'une économie de services se développe.

Pendant la plus grande partie de l'histoire de l'humanité, les sociétés, limitées par les ressources disponibles se sont organisées en économie organique. Ce type d'économie<sup>9</sup> désigne les sociétés pré-industrielles qui avaient pour unique ressource énergétique le flux solaire via la photosynthèse et le vent. Leur taille et leur croissance étaient limitées par les quantités d'énergie produites annuellement par la nature (WRIGLEY, 2013). Lors de la révolution industrielle, la contrainte exercée par la disponibilité des terres et qui limitait la croissance est modifiée. L'exploitation du charbon, élément clé des nouveaux systèmes énergétiques déclenche une transition vers une économie minérale<sup>10</sup>.

Selon KRAUSMANN (2013), le régime métabolique industriel qui en a résulté n'est que transitoire. Il ne peut pas correspondre à un régime stable car il crée des problèmes de soutenabilité. Au 19<sup>ème</sup> siècle, peu de personnes se soucient de l'épuisement des ressources mis à part JEVONS (1866) qui est l'un des premiers auteurs à prendre conscience et à analyser les contraintes liées à une économie dépendante d'un stock. Ce nouveau système énergétique amené par la révolution industrielle

---

8. Pour KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), elle croît très peu et diminue même pour ce qui concerne la consommation par habitant mais les équivalences adoptées pour ce calcul doivent être considérées avec précaution.

9. Le mot organique renvoie à ce que peut produire la nature annuellement mais il est plus exact de faire référence au soleil qui est à l'origine de la photosynthèse, et même en partie du vent formé par les différences de température et de pression.

10. Une économie minérale repose sur l'extraction d'énergies fossiles qui ont été accumulées durant plusieurs millions d'années, comme le charbon ou le pétrole.

repose sur l'exploitation de ressources épuisables, les énergies fossiles et crée par ailleurs des problèmes environnementaux, de pollution de l'air et de réchauffement climatique.

Depuis 1950, une *Grande Accélération* (STEFFEN et al., 2015) est observée : la croissance métabolique initiée par la révolution industrielle s'accélère. Les indicateurs socio-économiques mondiaux (population, PIB, consommation énergétique) croissent ainsi que les impacts environnementaux. Par ailleurs, jusqu'à présent, l'augmentation de la consommation d'énergie s'est accompagnée d'une amélioration du niveau de vie de la population mondiale. Or, une partie de cette population se trouve encore en situation de précarité énergétique. Si le régime industriel n'est pas modifié, l'amélioration de la situation des plus démunis énergétiquement favorisera et nourrira cette croissance de la consommation énergétique. La transition d'un régime métabolique industriel vers un nouveau régime métabolique organique représente donc un véritable défi et se présente paradoxalement comme la recherche d'un retour à notre état initial, celui d'une société organique.

Aussi, à ce stade, il nous paraît intéressant de se pencher sur la transition qui s'est déroulée lors de la révolution industrielle, générant ce basculement d'une économie organique à une économie minérale. Cette transition a initié le début de la période où les humains ont commencé à émettre de grandes quantités d'émissions de GES, déclenchant une rupture dans le fonctionnement des systèmes énergétiques et des sociétés en introduisant un accès abondant à une énergie bon marché. L'exhibition des caractères spécifiques de cette transition nous permettra de mettre en avant les moteurs et les conditions nécessaires à son émergence, et également de souligner les similitudes et les différences entre cette transition et une transition bas-carbone qui devrait consister à passer de l'économie minérale à une économie organique, soit en quelque sorte le miroir de la transition qui s'est opérée lors de la révolution industrielle.

### 2.1.2 *La révolution industrielle*

#### *De la biomasse au charbon*

La révolution industrielle a profondément transformé la société occidentale : l'accès à une énergie bon marché affranchit véritablement les humains des contraintes de la société organique. Le développement de l'industrialisation modifie les structures sociales et la culture de la société. Cette transition n'est pas dirigée et se produit de façon spontanée. En effet, elle a nécessité des conditions socio-économiques et géographiques particulières pour émerger mais elle n'est pas le fruit d'un pilotage d'un gouvernement mondial ou d'une société donnée, car les bénéfices économiques et sociaux qu'elle a apportés

ont suffi à produire les investissements nécessaires dans ces nouvelles infrastructures et technologies.

Les historiens se sont beaucoup interrogés sur les raisons de l'émergence de la révolution industrielle en Angleterre : pourquoi ce pays ? Pourquoi la révolution a-t-elle eu lieu au 18<sup>ème</sup> siècle ? Quels ont été les facteurs déterminants de cette révolution ? Comment peut-on l'expliquer ? Nous passerons ici en revue les points de vue de différents historiens qui proposent des perspectives et des clés de compréhension différentes même si tous accordent un rôle primordial au charbon pour expliquer la révolution industrielle et la croissance économique associée.

Un premier point à souligner et souvent méconnu est que l'utilisation du charbon en Angleterre s'était déjà relativement répandue avant le début de la révolution industrielle, dès le 17<sup>ème</sup> siècle. En 1700, la moitié de l'énergie consommée au niveau national provient du charbon (WRIGLEY, 2013). L'introduction de cette ressource se fait cependant dans le cadre d'une « économie organique avancée » (WRIGLEY, 2006) qui s'accompagne notamment d'une amélioration de la productivité dans l'agriculture. Avec l'augmentation de la densité de population et l'augmentation des prix du bois de chauffage, la population se tourne vers le charbon bien que cette énergie ait mauvaise réputation à cause de son odeur<sup>11</sup>. Le développement de cheminées plus efficaces favorise également sa diffusion. Le charbon est également de plus en plus utilisé dans les processus industriels mais il ne permet pas encore de produire de l'énergie mécanique. En particulier, la production de verre augmente et, dès le 18<sup>ème</sup> siècle, les Anglais sont étonnés de ne pas voir autant de vitres sur le continent européen que dans leur contrée (WRIGLEY, 2013).

Un deuxième point à noter est que l'Europe ne connaît pas de pénurie en bois bien que des déficits puissent apparaître localement (WARDE, 2006). La production de bois s'améliore notamment grâce à l'utilisation de techniques de gestion de la forêt apparues en Allemagne. Pour Warde, la société anglaise reste encore loin de toute « frontière écologique ». Pour WRIGLEY (2006), elle se trouve dans un état d'« économie organique avancée ». L'agriculture a notamment augmenté sa productivité bien qu'elle ne soit pas le moteur de la croissance économique en Angleterre (ALLEN, 2009). L'utilisation de charbon n'a pas encore fait basculer ce pays dans la révolution industrielle mais lui permet de commencer à s'affranchir des contraintes de l'économie organique. En effet, une économie de ce type doit pouvoir produire en surplus pour augmenter sa productivité (WRIGLEY, 2013) et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie est nécessaire pour s'affranchir des contraintes de l'économie organique. La croissance

---

11. Pour encourager l'utilisation de charbon comme énergie de chauffage, la noblesse à Londres dut montrer l'exemple malgré sa forte réticence (BRIMBLECOMBE, 2012).

que l'Europe connaît par la suite n'aurait donc pas été possible sans le charbon. En résumé, l'Europe n'était pas près d'une « frontière écologique » mais sans de nouvelles ressources, elle n'aurait pas pu connaître une période de croissance aussi soutenue.

Ce point de vue est partagé également par KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) qui soulignent que le bois seul n'aurait pas pu être à l'origine de la révolution industrielle. Les innovations liées aux énergies fossiles et leur utilisation étaient une condition nécessaire et un facteur explicatif déterminant de la croissance économique moderne. Dans leur livre *Power to the People*, les auteurs adoptent une perspective originale en prenant en compte l'ensemble des énergies nécessaires au fonctionnement des sociétés humaines, y compris donc l'alimentation des humains et des animaux. Ils identifient que le début de la transition énergétique coïncide avec une chute de la consommation énergétique par habitant due aux contraintes de l'économie organique : pression sur la terre, limitations liées au climat, faible efficacité des convertisseurs et coûts de transport élevés qui restreignent la croissance de la population et de l'économie. Les seules régions échappant à ce schéma sont l'Angleterre et les Pays-Bas qui utilisent déjà du charbon et de la tourbe. Avec l'augmentation de la demande des consommateurs et des industries au 18<sup>ème</sup> siècle, les ressources naturelles se font en effet plus rares et le coût du bois augmente. La principale condition de l'émergence de la révolution industrielle est donc le besoin de remplacer ces sources d'énergies devenues plus rares. Pour se libérer des contraintes de l'économie organique, KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) expliquent que la transition qui s'est déroulée lors de cette première révolution industrielle a consisté principalement à s'affranchir des limites de productivité et de disponibilité de la terre (*saving land*), d'où l'importance de prendre en compte l'énergie apportée par la nourriture.

Avec le développement de la production de charbon en Angleterre, le problème de l'évacuation de l'eau présente dans les mines s'intensifie. Habituellement, le vent ou la force musculaire des chevaux étaient utilisés. La mise au point de la machine de Newcomen (1712) permet de pomper l'eau en dehors des mines mais elle est très inefficace et son usage demeure limité aux mines de charbon. Le coût de transport ne permet pas d'avoir un prix suffisamment compétitif pour que son utilisation puisse être envisagée loin des centres miniers. Une série d'innovations incrémentales permet par la suite la mise au point de la machine de Watt (1769) qui apporte une amélioration notable par rapport à celle de Newcomen grâce à un condenseur séparé. Une nouvelle série d'innovations favorise sa diffusion à plus grande échelle, avec d'abord son utilisation dans les locomotives à vapeur qui réduit le coût de transport, puis dans la métallurgie et enfin un développement plus généralisé dans l'industrie et les divers centres manufacturiers. Les techniques développées en Angleterre comme les améliorations de

la fabrication de l'acier ou l'invention des chemins de fer vont ensuite progressivement s'étendre aux autres pays européens. La vitesse de déploiement sera très différente suivant les pays ce qui s'explique principalement par la disponibilité des ressources en charbon présentes sur les différents territoires (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013).

*Au-delà du charbon, les conditions favorables à son émergence*

Pour surmonter la contrainte d'une économie organique, l'utilisation du charbon a donc été un élément central. Si l'Angleterre n'avait pas disposé par hasard d'importantes ressources en charbon, son histoire économique aurait été très différente (MOKYR, 2009). Cependant ce pays n'était pas le seul pays à disposer de ressources charbonnières. Dans son livre *The Great Divergence*, POMERANZ (2000) cherche à comprendre pourquoi il y a eu une divergence économique entre l'Europe et la Chine alors que leurs situations en terme de développement économique et social sont similaires jusqu'aux années 1800. Son argument principal est que le charbon et les colonies ont été des facteurs clés pour surmonter la contrainte de la terre (*land constraint*). Il souligne l'importance des conditions fortuites qui ont présidé à l'avènement de la révolution industrielle en Angleterre. Le pays disposait de ressources en charbon affleurant donc facile à récupérer et qui se trouvaient près de régions où les besoins en énergie étaient importants. La localisation des mines en Angleterre était donc idéale, proche des centres manufacturiers avec, en outre, la disponibilité d'un transport fluvial bon marché. À l'inverse, en Chine, les centres manufacturiers qui se trouvaient dans la région de Shanghai étaient déconnectés des mines de charbon, éloignées dans le nord de la Chine.

ALLEN (2009), qui expose son analyse dans *The British Industrial Revolution in Global Perspective*, considère également que les facteurs de l'émergence de la révolution industrielle n'étaient réunis que dans ce pays. Il remonte au Moyen-Âge pour retracer l'évolution des conditions socio-économiques qui expliquent cette transition (ALLEN, 2012). Avec l'expansion du commerce grâce à la conquête de l'empire Britannique, l'Angleterre s'enrichit, ce qui favorise l'urbanisation du pays. En particulier, la croissance importante de la ville de Londres conduit à une augmentation de la demande en énergie de chauffage et par extension, à celle du coût du bois. Pour Allen, c'est le point de départ d'une série d'innovations, un processus qu'il nomme « invention collective » et qui aboutit à la cheminée utilisant du charbon (ALLEN, 2013). Londres, une ville en pleine croissance, se transforme rapidement et l'utilisation de la cheminée se répand. Tirée par l'augmentation de la demande en chauffage, la production de charbon devient bon marché. L'amélioration de l'extraction du charbon avec le pompage de l'eau en dehors des mines nécessite au départ une quantité très importante de charbon et donc une énergie bon marché. Par ailleurs, avec la croissance économique favorisée par le développement du commerce

et par l'urbanisation, les conditions de vie s'améliorent et les salaires augmentent. Les salaires élevés britanniques sont également dus à une mécanisation plus avancée que dans le reste de l'Europe, notamment dans l'industrie textile selon KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), ce qui favorise l'apparition de nouvelles technologies permettant d'économiser de la force de travail. Ce phénomène se déroule donc principalement en Angleterre puis dans l'Europe du Nord qui s'enrichit tandis que le Sud reste plus pauvre : « the Great Divergence caused the Industrial Revolution » (ALLEN, 2012).

L'énergie bon marché et les salaires élevés sont donc, pour Allen, les deux éléments moteurs de la révolution industrielle puisqu'ils ont favorisé la substitution du travail, notamment dans l'industrie textile et dans la métallurgie. Comme ces caractéristiques n'étaient réunies qu'en Angleterre, la révolution a débuté dans ce pays puis ne s'est diffusée dans le reste de l'Europe qu'après une phase d'amélioration des technologies.

La révolution industrielle a bien sûr bénéficié des innovations techniques qui étaient nécessaires pour augmenter l'exploitation des mines de charbon et satisfaire les besoins croissants de l'Angleterre. Pour KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), la transition se structure autour d'un *coal development block* qui comprend le charbon, la machine à vapeur et l'acier. Ce « bloc de développement » permet d'expliquer le succès du charbon en lien avec son utilisation dans d'autres secteurs à travers les phénomènes de *market widening* et de *market suction*. Par exemple, les innovations dans le secteur de la métallurgie et les améliorations de la machine à vapeur tirent la demande en charbon (*market suction*). L'utilisation du charbon dans le secteur du transport avec le développement du rail correspond à une expansion du marché (*market widening*). Chacun des éléments du « bloc de développement » se sont renforcés mutuellement grâce aux économies d'échelle et à la baisse des coûts qui ont permis la diffusion de ces innovations interdépendantes.

Les principales innovations de cette période (machine à vapeur, locomotive, nouveaux procédés de fabrication de l'acier) sont incontestablement anglaises. Comme nous l'avons mentionné, ces innovations techniques sont favorisées par l'amélioration du « capital humain », c'est-à-dire la diffusion de la culture et de l'éducation, soutenue par l'urbanisation et la révolution scientifique (ALLEN, 2009). Bien que la science à l'origine des inventions soit paneuropéenne, les efforts de recherche et développement se sont particulièrement concentrés en Angleterre car les mines de charbon se situaient dans ce pays. Cependant, sans nier la nécessité de disposer d'un capital technique indispensable pour mettre au point la machine à vapeur, POMERANZ (2000) minimise le rôle joué par les innovations technologiques qui auraient également pu être inventées en Chine.

Enfin, la possession de colonies a également pu constituer un autre avantage de l'Europe par rapport à la Chine selon POMERANZ (2000). L'Angleterre pouvait à travers le recours à ses colonies d'Amérique surmonter la contrainte de la terre (*land constraint*) en augmentant ses ressources disponibles comme le coton, le bois, le sucre ou le tabac. Leur utilisation dans les centres manufacturiers ont favorisé la croissance économique de l'Angleterre, phénomène que la Chine n'a pas connu. Cependant, cette thèse est contestée par WRIGLEY (2006) pour qui les importations concernaient des cultures qui ne pouvaient pas pousser en Angleterre et par THEODORIDIS, WARDE et KANDER (2018) qui considère que le calcul de Pomeranz néglige certains produits.

La plupart des historiens s'accordent sur l'importance du charbon dans l'avènement de la révolution industrielle. L'Angleterre n'aurait pas pu avoir cette croissance au 19<sup>ème</sup> siècle sans l'exploitation du charbon et aurait atteint les limites d'une société organique. Cependant, au début de sa révolution industrielle, l'Angleterre se trouvait déjà dans un état « avancé » (WRIGLEY, 2006) qui lui permettait d'être en croissance et ne rencontrait donc pas de contraintes. Par ailleurs, le système énergétique organique n'a pas disparu avec l'émergence du nouveau système basé sur le charbon mais s'est au contraire amélioré avec l'utilisation d'engrais synthétiques dans les sols. Sa part relative dans l'économie a néanmoins fortement diminué.

Les conditions nécessaires à l'émergence de la révolution industrielle étaient par ailleurs réunies uniquement en Angleterre ce qui souligne son caractère fortuit. Si elle a eu lieu dans ce pays, c'est parce que le contexte local était suffisamment spécifique pour que même un pays similaire comme les Pays-Bas<sup>12</sup> n'ait pu reproduire cette révolution (voir KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013, p.207). Des conditions socio-économiques favorables se sont en effet combinées aux contraintes de l'économie organique et à des conditions géographiques et de ressources particulières : charbon affleurant et proche des centres industriels, tradition de l'utilisation du charbon remontant au Moyen-Âge, baisse du prix du charbon, développement économique des centres urbains, capital scientifique, salaires élevés, contrainte sur la disponibilité des terres. Si l'utilisation du charbon s'est d'abord développée à cause de l'augmentation du prix de l'énergie, la baisse du coût de sa production a favorisé sa diffusion. Ces différents facteurs ont permis, grâce à l'innovation technique, deux principaux mouvements de *saving land* et de *saving labor*, pour économiser la terre et la force de travail (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). Par ailleurs, nous n'avons pas insisté sur les aspects institution-

---

12. Ce pays bénéficiait comme l'Angleterre d'une économie florissante avec des salaires élevés, d'une agriculture avec de hauts rendements et reposait déjà sur l'exploitation de ressources fossiles, principalement la tourbe.

nels<sup>13</sup> et le mouvement des Lumières qui ont également favorisé cette transition, notamment étudiés par l'historien MOKYR (2009). Nous rejoignons ici PEARSON et FOXON (2012) pour qui les différentes analyses « demonstrate that an extra-ordinarily rich blend of economic, cultural, institutional and technological factors preceded, catalysed and sustained the first industrial revolution ».

Enfin, on remarquera que la révolution industrielle n'a pas été pilotée par un acteur ou un gouvernement ou d'autres institutions mais est le résultat de conditions socio-économiques et culturelles favorables à son émergence. Elle s'est déroulée de façon spontanée, sans contrôle spécifique, puisque l'évolution du système énergétique ne devait pas atteindre des objectifs fixés par avance. Cette caractéristique précise, la spontanéité, la distingue de la transition énergétique bas-carbone que nous devons mener aujourd'hui pour lutter contre le changement climatique, comme nous le détaillerons en [section 2.3](#). En effet, cette transition nécessite au contraire une coordination active entre tous les acteurs aussi bien au niveau mondial et national que local ce qui la différencie fortement de la révolution industrielle. Elle doit être pilotée pour que l'objectif de décarbonation soit atteint.

### 2.1.3 Florilège de transitions énergétiques remarquables

Au-delà de la révolution industrielle, d'autres transitions énergétiques ont été étudiées par les historiens. Ces analyses sont menées à différentes échelles : au niveau mondial ou d'un ensemble de pays (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013), à l'échelle d'un seul pays (SMIL, 2017) ou encore d'un sous-secteur particulier du système énergétique (SOLOMON et KRISHNA, 2011 ; FOUQUET, 2010). Ce manuscrit n'a pas vocation à proposer une analyse exhaustive de l'ensemble des transitions qui ont été étudiées dans la littérature. Nous en présenterons quelques-unes qui nous ont paru apporter des éléments saillants pour la compréhension du phénomène de transition qui nous préoccupe et en particulier, des conditions de son émergence et de ses moteurs.

#### *Les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> révolutions industrielles*

Comme nous l'avons évoqué, au 20<sup>ème</sup> siècle se déroule une deuxième révolution industrielle avec le déploiement du pétrole et de l'électricité. Elle coïncide avec une augmentation de la consommation énergétique. Alors que la découverte de champs de pétrole aux États-Unis et leur exploitation remonte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation du pétrole ne prendra son essor qu'après la Seconde Guerre mondiale ce qui peut s'expliquer par une dépendance au sentier<sup>14</sup> dans les pays européens.

---

13. Pour COURT (2018), les structures familiales devraient également être mieux étudiées et prises en compte pour expliquer les évolutions du système énergétique.

14. Les investissements passés dans des infrastructures rendent plus coûteux leur changement que si celles-ci n'existaient pas.

Le moteur de cette deuxième évolution du système énergétique correspond à un « bloc de développement » comprenant le pétrole et le moteur à combustion interne (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013, Chap.9). Celui-ci a entraîné une révolution dans les transports avec le développement des infrastructures routières et la création d'une industrie automobile (phénomène de *market suction*). Avec la baisse des coûts, le pétrole est ensuite utilisé dans le secteur maritime (*market widening*). L'autre « bloc de développement » comprend outre l'électricité et ses moyens de production, les transformateurs de courant qui entraînent une diffusion de l'utilisation de l'électricité dans l'industrie et les habitations, d'abord dans les villes puis dans les zones plus rurales. Avec l'apparition de nouveaux appareils ménagers, la demande en électricité augmente. Dans les années 1970, une nouvelle révolution industrielle a lieu selon KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) grâce aux technologies de l'information et de la communication. La principale innovation associée est le transistor. Même si le déploiement de nouveaux usages associés à cette technologie s'est accompagné d'une forte croissance de la consommation d'énergie dans tous les secteurs, elle s'est avérée être un vecteur d'économie d'énergie.

Les moteurs de ces deux dernières révolutions industrielles ont donc été pour les auteurs de *Power to the people*, les « blocs de développement » qui se structurent autour d'innovations techniques, entraînant d'abord des mouvements de *market suction* puis de *market widening*. Les impacts sont d'abord limités car les innovations remplacent des technologies déjà existantes. Quand de nouvelles applications apparaissent, les innovations clés sont appliquées dans de nouveaux secteurs. Enfin, contrairement à la première révolution industrielle qui avait procédé par tâtonnement dans l'élaboration des nouvelles technologies, les innovations sont rendues possibles par la constitution d'un corpus scientifique plus élaboré et une solide formation scientifique des inventeurs. Notons par ailleurs que la première révolution industrielle qui avait modifié la structure du système économique en instaurant une croissance « moderne », a également constitué une condition de l'émergence des révolutions industrielles ultérieures.

### *Les Pays-Bas*

À l'échelle nationale, les Pays-Bas ont connu plusieurs transitions remarquables : la première a lieu au 17<sup>ème</sup> siècle, durant son siècle d'or<sup>15</sup>. Afin d'augmenter sa productivité, l'exploitation de la tourbe<sup>16</sup> permet d'étendre les terres cultivables du pays (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013, Chap.4). Comme l'exploitation du charbon en Angleterre, la tourbe ainsi que la construction de moulins à vent permettent

---

15. Cette période correspond à l'expansion de la république des Provinces-Unies qui devient une des premières puissances mondiales.

16. La tourbe est une matière organique fossile, elle n'est pas considérée comme une ressource renouvelable.

aux Pays-Bas d'augmenter la consommation d'énergie par habitant, et d'entamer une phase de croissance économique marquée par l'expansion des cités. Les moulins à vent apportent ainsi de la puissance et constituent un moyen d'économiser de la terre et du travail humain, bien que leur part dans le système énergétique global reste limitée. Les Pays-Bas peuvent également s'appuyer sur le développement de leur empire colonial et leur domination du commerce mondial. La deuxième transition que connaît le pays a lieu beaucoup plus tard au 20<sup>ème</sup> siècle : la découverte de l'important champ gazier de Groningen en 1959 permet au pays de sortir rapidement du charbon. L'État ainsi que les entreprises gazières élaborent un *Master plan* visant à promouvoir une société du gaz (GALES, 2013). Sa mise en œuvre se traduit par la fermeture des mines de charbon existantes et la construction d'un réseau de gaz dans tout le pays pour l'alimentation d'une grande partie des ménages. La transition est particulièrement rapide puisqu'en une dizaine d'années, le gaz permet de fournir près de 50 % de l'énergie primaire du pays (SMIL, 2010b, Chap.3). Les moteurs de cette transition sont principalement d'ordre économique car l'État bénéficie de la manne financière que représentent les exportations et de l'amélioration de sa compétitivité nationale grâce au remplacement du charbon par une énergie moins coûteuse. En concertation avec les principales compagnies pétrolières ayant découvert le gisement, le gouvernement néerlandais met en place un marché permettant d'alimenter les industries du pays et par la suite le secteur résidentiel.

#### *Le système électrique en France*

Une transition souvent étudiée dans la littérature (SMIL, 2010b ; SOLOMON et KRISHNA, 2011 ; ARAUJO, 2013) est celle du système électrique français avec le développement de l'énergie nucléaire. Le programme nucléaire est lancé dans les années 1970 et permet d'augmenter la part de la production d'électricité d'origine nucléaire à près de 75 % en 1990. La construction en série de réacteurs nucléaires est soutenue à la fois par le gouvernement, les élites administratives et l'entreprise publique Électricité de France (EDF) en charge de la construction et de l'exploitation des centrales. Les raisons du succès de cette transition résident, selon SOLOMON et KRISHNA (2011), dans les économies d'échelles qui ont entraîné la diminution du coût des réacteurs avec les constructions en série, la faible contestation sociale et enfin le ralliement des élites pour le soutien du programme. Ces divers facteurs ont permis une transition rapide. Nous analyserons plus en détail cette période dans le [chapitre 3](#). Comme dans le cas des Pays-Bas, cette transition s'est produite via le contrôle de l'État qui l'a impulsé avec ses motivations d'ordre économique (recherche d'indépendance énergétique, compétitivité des coûts face au pétrole). Le contrôle de cette transition peut être identifié à un contrôle en boucle ouverte puisque certains ajustements ont été nécessaires a pos-

teriori : la surcapacité des centrales nucléaires a par exemple entraîné la diffusion du vecteur électrique dans des usages non captifs de l'électricité.

#### *Les transports au Brésil*

Le Brésil a lui aussi réussi à conduire une transition très rapide dans le secteur des transports : à une consommation énergétique majoritairement dépendante du pétrole s'est substitué un système utilisant des biocarburants, passant de 1 % de la consommation énergétique dans le secteur du transport dans les années 1970 à 17 % dans les années 2010 (mais près de 41 % de la consommation des voitures) (ARAÚJO, 2013, Chap. 4). Le succès de cette transition rapide se trouve là encore dans le soutien du gouvernement qui y voit le moyen d'atteindre différents objectifs : réduction de la dépendance aux importations de pétrole, développement de l'industrie automobile brésilienne ainsi que de la filière de production de sucre (SOLOMON et KRISHNA, 2011). Trois principaux facteurs permettent cet aboutissement : des efforts de R&D qui favorisent les innovations, le soutien de l'État au programme ainsi que celui des différents acteurs industriels et économiques. La continuité dans les politiques et le soutien institutionnel ont donc été primordiaux (MEYER et al., 2014). Les moteurs de cette transition sont, dans ce cas également, en grande partie d'ordre économique puisque c'est la crise du pétrole en 1973 et le coût bas du sucre qui a rendu cette substitution économiquement intéressante (PEARSON, 2018).

#### *Les gaz de roche-mère aux États-Unis*

La transition récente aux États-Unis vers les gaz de roche-mère (ou gaz de schistes) a obéi uniquement à des critères économiques : les améliorations obtenues dans les procédés de fracturation hydraulique ont conduit à une baisse importante des coûts de production de cette énergie et ont recomposé le paysage énergétique mondial avec des impacts sur les prix des énergies fossiles (WANG et al., 2014; GENG, JI et FAN, 2016). Pendant très longtemps, cette ressource était considérée par les milieux pétroliers comme trop coûteuse à exploiter. Les investissements dans la R&D qui ont entraîné la baisse des coûts ont toutefois été fortement soutenus par le gouvernement (TREMBATH et al., 2012).

À travers ces quelques exemples, on constate que chaque transition a eu lieu dans un contexte socio-économique spécifique. Mais certains éléments communs peuvent être relevés.

Les transitions qui se déroulent à l'échelle mondiale obéissent principalement à des considérations économiques et ne sont pas pilotées par un acteur spécifique. Comme KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) l'ont illustré, l'émergence de macro-innovations, due à un contexte

économique favorable, permet de former un « bloc de développement » à partir duquel une transition va se déployer. Si au niveau national, les transitions énergétiques n'obéissent pas uniquement à des considérations économiques, elles restent grandement déterminées par celles-ci. Bien que les transitions puissent être contrôlées par l'État, leurs moteurs relèvent en effet principalement de l'économie : amélioration de la compétitivité, recherche d'indépendance énergétique pour équilibrer la balance commerciale, soutien de l'industrie, etc. La modification du système énergétique n'a jamais été un objectif en soi et reposait donc sur d'autres motivations. Les transitions concernent alors aussi bien un secteur particulier du système énergétique comme le transport routier au Brésil et la production d'électricité en France, ou l'ensemble du système énergétique comme aux Pays-Bas. Dans le premier cas, elles sont caractérisées par un gouvernement étatique fort et se sont déroulées rapidement, en quelques dizaines d'années puisqu'elles étaient limitées à un secteur. Dans le second cas, une convergence d'intérêts privés et publics a permis de restructurer l'ensemble du système énergétique.

## 2.2 CARACTÉRISER LES MOTEURS DES TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES

L'analyse des conditions de l'émergence de la transition varie suivant les auteurs qui insistent, selon le cas, sur l'existence de différents moteurs. Même si les transitions dépendent de plusieurs paramètres, certaines caractéristiques communes peuvent être observées. Certaines « leçons » ont ainsi été tirées de l'analyse des transitions énergétiques (WILSON et GRUBLER, 2011; BASHMAKOV, 2007; FOUQUET, 2016b). Nous proposons de compléter cette caractérisation avec des éléments communs que nous avons pu dégager de notre observation des transitions passées.

Tout d'abord, on distingue plusieurs types de transition, bien qu'ils soient reliés entre eux : les transitions de ressources, de vecteurs énergétiques<sup>17</sup>, de services énergétiques et de convertisseurs énergétiques (O'CONNOR, 2010). Cette distinction est similaire à celle proposée par FOUQUET (2010) qui différencie dans une transition la source d'énergie, l'infrastructure et le service associé. Chaque transition est en fait le résultat de plusieurs petites transitions. Une transition est donc composée de multiples transitions dans différents secteurs et services (FOUQUET, 2010). Quant à GRUBLER (2009b), il préfère à la vision chronologique, la description suivante qui recouvre, de son point de vue, les principales transitions qui se sont déroulées dans le monde :

---

17. Un vecteur énergétique désigne une énergie stockable et transportable d'un endroit à un autre, comme l'électricité ou les énergies fossiles qui sont transportées sur de longues distances.

- transition dans la quantité d'énergie utilisée : la société est passée d'une situation de pénurie à une situation d'abondance énergétique.
- transition dans la structure de l'utilisation de l'énergie : l'urbanisation des villes avec l'augmentation de la densité de la population et la croissance de la consommation d'énergie nécessite une forte densité de puissance pour délivrer l'énergie nécessaire.
- transition dans la qualité et la productivité de l'énergie : celles-ci s'améliorent constamment.

Pour cette dernière transition, la tendance s'est plutôt inversée ces dernières années : la part du pétrole conventionnel, plus facilement récupérable que le non-conventionnel, diminue dans la production totale et les compagnies recourent à des gisements toujours plus coûteux et difficile à exploiter. Le taux de retour énergétique associé au pétrole diminue. Par ailleurs, la qualité des énergies renouvelables au regard de la densité énergétique ou des services délivrés est moindre que celle des énergies fossiles. Si les sources exploitées après la révolution industrielle comme le charbon ou le pétrole étaient plus concentrées que les ressources liées aux bioénergies, le recours à des énergies renouvelables tend de nouveau à disperser les sources d'énergie.

### 2.2.1 La temporalité des transitions

Une première étude sur la temporalité des transitions a été menée par MARCHETTI (1977) qui cherche à déterminer des constantes de temps auxquelles obéiraient les transitions du système énergétique à partir d'analyse logistique<sup>18</sup>. Cette question de la temporalité a par ailleurs récemment suscité un débat au sein de la communauté de chercheurs qui travaillent sur les transitions (GRUBLER, WILSON et NEMET, 2016 ; SOVACOOOL, 2016 ; SOVACOOOL et GEELS, 2016 ; SMIL, 2016 ; KERN et ROGGE, 2016 ; BROMLEY, 2016). Contrairement à SOVACOOOL (2016) et KERN et ROGGE (2016) qui considèrent qu'une transition énergétique peut avoir lieu rapidement, la majorité des historiens s'accordent sur la lenteur des transitions. Cette dichotomie, résumée par SOVACOOOL et GEELS (2016), oppose ceux qui, comme Grubler ou Smil, insistent sur l'aspect technico-économique des transitions à ceux qui, comme Sovacool ou Geels, soulignent l'importance des conditions sociales et politiques dans lesquelles se déroulent la transition. En effet, le contexte réglementaire, culturel et social peut favoriser une diffusion plus ou moins rapide des technologies comme cela a été montré par le courant des *Sustainability Transitions* (voir sous-section 1.4.1) qui analyse l'importance des réactions des firmes en place, des nouveaux

18. Pour reprendre la critique de SMIL (2010b), les analyses de Marchetti se sont révélées erronées principalement parce qu'elles ne prenaient pas en compte l'influence des actions humaines.

entrants et des institutions. Pour ces auteurs, le fait que des transitions aient pu se dérouler rapidement dans le passé conduit à être optimiste pour le futur : la volonté politique permettra à la transition énergétique bas-carbone de se dérouler rapidement et ce, même si les arguments économiques ne lui sont pas favorables.

Un autre élément pouvant favoriser des transitions rapides est la survenue d'évènements exogènes comme l'embargo pétrolier de l'OPEC<sup>19</sup> qui a conduit à une augmentation des cours du pétrole et à une réponse de plusieurs pays pour pallier cette crise (programme nucléaire en France ou celui de biocarburants au Brésil). Certains évènements peuvent donc avoir une influence sur la transition, tout comme le contexte institutionnel, économique, social et idéologique propre à chaque région peut faciliter ou, au contraire, retarder le changement si la dépendance au sentier est trop importante par exemple (FOUQUET et PEARSON, 2012).

L'historien ALLEN (2012) considère que la transition est un processus lent. Les transitions de l'ensemble du système énergétique que nous avons présentées auparavant sont généralement longues, de plusieurs décennies à quelques siècles, principalement à cause du temps de maturation des technologies et de leur diffusion au sein des différents secteurs comme le montre l'exemple de la transition vers le charbon en Grande-Bretagne. Pour SOLOMON et KRISHNA (2011), « shifts lasted over a century or longer ». L'utilisation de nouvelles sources d'énergies a toujours impliqué des longues périodes de développement : conception des innovations, expérimentation, apprentissage avant mise à l'échelle et diffusion plus vaste (WILSON et GRUBLER, 2011). FOUQUET (2010) a étudié pour différents services énergétiques (la chaleur et l'éclairage dans le résidentiel, la chaleur dans l'industrie, le transport, etc.) les technologies qui ont été déployées et le temps qui a été nécessaire pour arriver à dominer le secteur considéré au Royaume-Uni. La plus rapide a été celle de l'éclairage dans le résidentiel qui a duré 40 ans. Il identifie en général une phase d'innovation des technologies qui dure environ un siècle suivie d'une phase de diffusion de près de 50 ans. Cette analyse rejoint en partie celle de KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) avec les « blocs de développement » : le délai entre l'invention et l'adoption généralisée d'une technologie entraîne des discontinuités dans le développement économique ce qui induit une transition longue.

Si pour un secteur spécifique, la transition peut effectivement avoir lieu rapidement en quelques dizaines d'années (FOUQUET, 2010; SMIL, 2016; GRUBLER, 2012), les transitions qui agrègent de multiples transitions sectorielles peuvent aisément se dérouler sur plusieurs générations (FOUQUET et PEARSON, 2012). En particulier, la transition du système énergétique mondial a toujours été longue et a suivi un processus graduel selon SMIL (2016). Une transition de l'ensemble du

---

19. Organisation des pays exportateurs de pétrole.

système énergétique est en effet composée de multiples transitions dans chacun de ses sous-secteurs : les technologies à déployer leur sont spécifiques, et l'innovation qui émerge dans un secteur peut ne pas être appliquée directement dans les autres branches. Son déploiement nécessitera alors plus de temps (FOUQUET, 2016a). Les transitions rapides proposées en exemple par SOVACOOOL (2016) sont celles de secteurs spécifiques dans des pays particuliers.

La vitesse à laquelle se déroule une transition dépend de plusieurs facteurs. Premièrement, elle relève de la définition de la transition énergétique : pour certains auteurs il faut qu'un vecteur énergétique atteigne 25 % de part de marché, pour d'autres 50 % (SOVACOOOL, 2016). Suivant la valeur de ce ratio, le temps de diffusion et de domination d'un vecteur énergétique pourra varier. Deuxièmement, elle est liée à l'échelle considérée (locale, nationale ou mondiale) : plus l'ampleur géographique du changement est important, plus ce processus est lent (WILSON et GRUBLER, 2011). Une transition avérée à l'échelle nationale ne signifie pas qu'elle soit terminée au niveau mondial : la transition du charbon vers le pétrole a duré près de 50 ans aux États-Unis mais a duré un siècle au niveau mondial. De même, la transition de l'ensemble du système énergétique est plus lente puisque plus complexe que la transition d'un secteur spécifique : la transition bois-charbon qui a duré près de 400 ans au Royaume-Uni n'a duré que 80 ans dans le secteur de la production d'acier (FOUQUET, 2010). FOUQUET (2010) considère toutefois que la vitesse des transitions s'est accélérée après la révolution industrielle. GRUBLER (2012) montre ainsi que les transitions des sources d'énergies renouvelables vers le charbon (la première révolution industrielle) ont duré plus longtemps que celles de sortie du charbon vers le pétrole, le gaz et l'électricité. Enfin, un pays pionnier qui réalise pour la première fois une transition mettra en général plus de temps que les pays suivants qui pourront bénéficier de processus d'apprentissage (WILSON et GRUBLER, 2011 ; GRUBLER, 2012 ; WILSON, 2012). L'adoption tardive d'une technologie par rapport à d'autres pays favorise ainsi une diffusion plus rapide.

### 2.2.2 *Le rôle essentiel de l'innovation technologique*

L'innovation technologique joue un rôle important dans le processus des transitions passées. Les grandes transitions au niveau mondial se sont appuyées sur de nouveaux vecteurs et sources d'énergie : l'alimentation produite par l'agriculture, le charbon, le pétrole puis l'électricité<sup>20</sup>. Associées à ces vecteurs énergétiques, des innovations ont remplacé les technologies existantes. Pour SMIL (2013), « inventions and diffusion of new prime movers drove most energy transition ».

---

20. La 3<sup>ème</sup> révolution industrielle analysée par KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) ne repose cependant pas sur un nouveau vecteur énergétique mais sur une nouvelle technologie, le transistor.

Dans son livre *Energy transitions: history, requirements, prospects*, SMIL (2010b) décrit ainsi les différents changements technologiques associés à chaque transition. GRUBLER, NAKICENOVIC et al. (2014) souligne leur importance en particulier dans les services finaux. Comme expliqué précédemment, KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) considèrent que chaque transition se construit autour d'un « bloc de développement » comme celui constitué par le pétrole et le moteur à combustion interne. Ce bloc associant un vecteur énergétique et des macro-innovations entraîne une recomposition du système énergétique à travers les économies d'échelle et la baisse de coût en résultant (GRUBLER, NAKIĆENOVIC et VICTOR, 1999). Ce concept rejoint celui de *general purpose technology* : une technologie seule n'entraîne pas une transition, c'est un ensemble de technologies qui se déploient dans une variété d'applications (WILSON et GRUBLER, 2011). Par exemple, un changement d'énergie implique une modification des infrastructures. Pour O'CONNOR (2010), les nouvelles technologies ont même plus d'importance que la disponibilité des ressources.

Enfin, pour ALLEN (2012) et SOLOMON et KRISHNA (2011), les brevets ne sont pas nécessaires pour innover et dans le cas particulier de la révolution industrielle en Angleterre, le brevet déposé pour la machine de Watt aurait même empêché la survenue plus rapide d'améliorations.

### 2.2.3 Des services nouveaux et moins chers

Les innovations technologiques sont un élément caractéristique des transitions dans le passé car elles présentent généralement un intérêt économique : soit leur coût est bas, soit leur performance est élevée ce qui peut généralement se traduire par un avantage économique. Le coût d'une technologie doit donc évoluer favorablement (SOLOMON et KRISHNA, 2011) même si le changement de technologie peut d'abord se faire grâce à ses performances ou à la nouveauté du service proposé associé. Selon FOUQUET (2010), les principaux moteurs des transitions sont une énergie bon marché et/ou la nouveauté du service. En effet, ces nouvelles technologies permettent d'offrir le même service (transport, chauffage, éclairage) avec des nouvelles caractéristiques (plus propre, plus simple ou plus flexible par exemple) (FOUQUET, 2016a). Ce nouveau service s'adresse donc d'abord à une niche de marché, puis, lorsque son coût diminue, il se diffuse dans les autres secteurs de la société. Pour WILSON et GRUBLER (2011) et GRUBLER (2012), la nouveauté du service énergétique est même plus importante que le prix associé, au moins dans un premier temps. Les grandes transitions historiques ont d'ailleurs toutes été accompagnées de services énergétiques finaux nouveaux.

Un service meilleur marché est cependant souvent dû à une énergie peu coûteuse. ALLEN (2012) met en avant le rôle joué par les prix et

plus généralement la richesse d'un pays dans la transition, comme ce fut le cas en Angleterre. Indubitablement, « a lower price of energy service was necessary to achieve the energy transition » (FOUQUET, 2010). L'importance des facteurs économiques est également soulignée par de nombreux autres chercheurs (GRUBLER, WILSON et NEMET, 2016; KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013; SOLOMON et KRISHNA, 2011). Pour KANDER, MALANIMA et WARDE (2013), l'énergie bon marché du charbon a été nécessaire à la révolution industrielle. Pour GRUBLER, WILSON et NEMET (2016), la vitesse de diffusion des technologies peut s'expliquer par trois facteurs : leurs coûts, la rentabilité de leur adoption et les caractéristiques du secteur. Les transitions dans le passé ont donc eu dans leur grande majorité pour moteur des services moins coûteux. Entre des énergies à coût bas et des services associés nouveaux ou meilleurs, des boucles de rétroaction positives ont entraîné la croissance de la demande, et donc la baisse des coûts avec les économies d'échelle et l'amélioration de la qualité des services proposés.

#### 2.2.4 *L'augmentation de la consommation d'énergie*

L'idée de transition énergétique renvoie souvent à un changement de mix énergétique sans considération pour les valeurs absolues. Mais une des caractéristiques principales des transitions passées est l'augmentation de la consommation d'énergie (FOUQUET, 2016a). En part relative, la plupart des systèmes énergétiques nationaux sont aujourd'hui basés principalement sur des énergies fossiles. En ce qui concerne les valeurs absolues, on constate cependant que la quantité d'énergie issue de la biomasse n'a pas diminué de façon importante. La transition au niveau mondial est donc jusqu'à présent une histoire d'« additions énergétiques » (FRESCOZ, 2014). L'énergie a été identifiée comme un des principaux moteurs de la croissance économique, les innovations dans le domaine de l'énergie étant une condition nécessaire de celle-ci (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). Cependant, dans certains pays et en Europe notamment, on constate une stagnation de la consommation d'énergie : la dernière révolution industrielle avec les technologies de l'information et de la communication a permis d'améliorer l'intensité énergétique du PIB et d'amorcer un découplage entre croissance et consommation d'énergie (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). L'augmentation des revenus des pays en développement devrait compenser cette tendance européenne et l'on devrait assister à une augmentation mondiale de la consommation d'énergie (GRUBLER, 2009b). Celle-ci va par ailleurs probablement concerner la demande d'énergie de bonne qualité (*high power-density demand*) qui peut être fortement émettrice de GES (SMIL, 2013).

### 2.2.5 *La géographie des ressources*

La disponibilité et la localisation des ressources est évidemment primordiale dans le déclenchement et la vitesse de la transition. La présence de charbon affleurant en Grande-Bretagne a ainsi été un élément clé dans la transition du bois vers le charbon dans ce pays (voir [sous-section 2.1.2](#)). Les pays d'Europe du Sud ont quant à eux réalisé leur transition plus tard que les pays d'Europe du Nord (GALES et al., 2007) puisqu'ils ne disposaient pas d'autant de ressources fossiles. MADUREIRA (2008) analyse le rôle qu'ont joué la disponibilité des ressources et les objectifs fixés par les politiques dans l'évolution des systèmes énergétiques du Portugal et de l'Espagne. On y observe en particulier le déploiement plus tardif que dans le Nord de systèmes de production d'électricité à bas coût. Pour la révolution industrielle, KANDER, MALANIMA et WARDE (2013, Chap.5) décryptent ainsi des transitions réalisées par plusieurs groupes de pays à des moments différents : l'Angleterre suivie de pays comme la France et l'Allemagne ont réalisé leur transition au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle tandis que les pays du Sud de l'Europe sont passés au charbon vers 1900. Le même type d'analyse pourrait être repris avec les ressources en pétrole, gaz ou hydrauliques. Concernant le développement du nucléaire en Allemagne, AYKUT et EVRARD (2017) expliquent qu'il a été principalement poussé par les régions du sud qui ne possédaient pas de ressources charbonnières, avec en toile de fond un enjeu politique entre le soutien du nucléaire par les partis conservateurs et celui du charbon par les partis sociaux-démocrates. L'absence de ressource conséquente d'énergies fossiles en France et en Suède a également participé à la décision de lancement d'un programme nucléaire civil dans ces pays (MEYER, 2017c).

### 2.2.6 *Le soutien institutionnel*

Les décisions politiques peuvent également jouer un rôle important dans les transitions comme on l'a vu dans le cas des Pays-Bas, de la France et du Brésil. À travers des investissements dans les infrastructures et l'adoption de différentes mesures comme les subventions, les taxes ou les normes, les gouvernements peuvent favoriser une option énergétique (O'CONNOR, 2010). Cependant, si ces transitions se sont réalisées grâce à un soutien continu dans le temps de l'État, in fine, les coûts des technologies doivent suivre une évolution favorable et diminuer (SOLOMON et KRISHNA, 2011). Par ailleurs, comme pointé par le courant des *Sustainability Transitions*, les technologies se développent souvent au sein de niches. Le soutien à leur développement peut être important pour leur succès même si au départ, elles peuvent apparaître d'un intérêt limité. KANDER, MALANIMA et WARDE (2013) insistent sur l'importance du cadrage institutionnel pour

favoriser les innovations, soutenir le développement de technologies dans des niches et permettre leur diffusion dans divers secteurs grâce notamment à des complémentarités entre plusieurs services.

### 2.3 LES DÉFIS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE

Les caractéristiques des transitions passées que nous avons soulignées dans la partie précédente font ressortir les éléments distinctifs de la transition énergétique bas-carbone et les défis associés à son élaboration. Tout d'abord, il s'agira de ne pas tomber dans les écueils de lenteur des transitions passées. Les objectifs fixés par l'Accord de Paris nécessitent de réaliser une transition rapidement, en quelques dizaines d'années, alors que jusqu'à présent, la durée des transitions a été bien plus longue. La transition énergétique bas-carbone diffère également par le fait qu'elle doit être compatible avec les contraintes d'une économie organique. En outre, elle sera très probablement coûteuse puisqu'il n'y a pas, pour l'instant, de macro-innovation susceptible d'entraîner une reconfiguration spontanée de l'ensemble du système énergétique<sup>21</sup>. Elle pourrait donc constituer un obstacle à la croissance économique. Or les moteurs des transitions observées dans le passé ont souvent été d'ordre économique. Si ces conditions de rentabilité et d'attractivité économique ne sont pas réunies, le pilotage de la transition énergétique doit être envisagé différemment. En particulier, le rôle des politiques publiques devra se trouver renforcé.

#### 2.3.1 *Une transition dirigée et pas spontanée*

Des enseignements de l'étude rétrospective des transitions, nous avons constaté que les transitions énergétiques à l'échelle mondiale ont été souvent mues par des intérêts économiques. Le pouvoir public n'avait souvent pas de rôle pro-actif (FOUQUET et PEARSON, 2012), ou alors comme nous l'avons vu, sa motivation pour leur accompagnement était économique. Jusqu'à présent, les transitions étaient donc plutôt des phénomènes endogènes (PEARSON, 2018). Au contraire, la transition énergétique vers un système décarboné ne pourra se produire spontanément. En effet, les moteurs économiques ne sont pas suffisants pour la faire émerger : les technologies bas-carbone actuelles ne présentent pas de caractéristiques suffisamment avantageuses par rapport aux technologies émettant beaucoup de CO<sub>2</sub>, leur valeur économique sur les marchés n'est pas assez élevée. Autrement dit, le charbon est encore dans beaucoup d'endroits du monde une source d'énergie à très bas prix et, sans réglementation environnementale, elle reste le choix le plus économique. La substitution entre des technologies carbonées et décarbonées ne se fera ni rapide-

21. Il y a toutefois des avocats d'un système énergétique qui serait centré sur l'hydrogène (RIFKIN, 2003).

ment ni naturellement (PEARSON et FOXON, 2012). Kander souligne ainsi : « [the transition] will not occur from consumer demand or competition on the supply side » (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). Les bénéfices apportés par la transition énergétique bas-carbone sont évidemment nombreux si on considère toutes les conséquences désastreuses que les changements climatiques pourraient entraîner, qu'elles soient environnementales (biodiversité notamment) mais aussi sociales, géopolitiques et économiques. Cependant, ces externalités ne sont pour l'instant pas bien prises en compte dans les calculs de rentabilité économique et la transition bas-carbone ne présente que peu d'intérêt économique à court terme. Les bénéfices apportés par celle-ci sont donc moins clairs pour les producteurs et les consommateurs que lors des transitions passées (FOUQUET et PEARSON, 2012).

La différence entre les transitions passées et la transition bas-carbone réside en effet dans le fait que les précédentes transitions *apportaient* des services nouveaux et de la croissance économique tandis que la transition bas-carbone doit, elle, nous permettre d'*éviter* des conséquences redoutables et catastrophiques. SOVACOOOL et GEELS (2016) le reformulent autrement : « historical transitions were more 'opportunity' driven, whereas low carbon transitions are more 'problem-driven' ». Ses bénéfices sont plus compliqués à évaluer puisqu'ils sont étalés dans le temps donc difficiles à appréhender et sujets aux incertitudes qui entourent l'estimation des dommages associés à l'augmentation des températures. La lutte contre les changements climatiques pose par ailleurs le problème classique du passager clandestin : un pays n'a pas intérêt à investir individuellement dans une transition coûteuse car il pourra bénéficier « gratuitement » de l'action entreprise par les autres pays. En effet, la réduction des émissions de GES dans un pays limite les conséquences du réchauffement climatique pour le monde entier et pas seulement pour ce pays. En outre, en débutant une transition plus tard, un pays profite de retours d'expérience et éventuellement de coûts plus bas.

Une majorité de chercheurs (Kander, Fouquet, Grübler, etc.) s'accordent donc sur la nécessité d'accompagner la transition énergétique. Il est fort probable que l'action des gouvernements devrait être réglementaire puisque les citoyens eux aussi se trouvent dans la disposition de passagers clandestins : le bénéfice est collectif mais le coût individuel. L'action gouvernementale apparaît donc indispensable, en particulier pour protéger les nouvelles niches d'innovations technologiques (FOUQUET, 2010). La protection de la chaîne d'innovation devrait être soutenue à la fois par les gouvernements et la société, car maintenir une grande variété de niches permet de garder différentes options ouvertes et d'envisager une variété de systèmes énergétiques (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). Même si ce qui s'est produit dans le passé n'a pas de valeur prédictive, les facteurs dont nous avons relevé l'importance dans le passé devraient être également prédomi-

nants dans le futur : des services nouveaux et meilleur marché seront clés pour la transition (FOUQUET, 2010). Les gouvernements ont donc intérêt à mettre l'accent sur les co-bénéfices apportés par la transition en favorisant l'attractivité des services décarbonés.

Cette action gouvernementale doit être soutenue en continu dans le temps (SOLOMON et KRISHNA, 2011 ; GRUBLER, 2012). L'ensemble des politiques doit être coordonné pour atteindre les objectifs d'une transition énergétique bas-carbone car celle-ci implique des changements systémiques et mondiaux qui se dérouleront sur plusieurs décennies au minimum (GRUBLER, WILSON et NEMET, 2016). De façon similaire aux transitions passées, la transition énergétique bas-carbone devrait impliquer des changements culturels et sociaux importants (FOUQUET et PEARSON, 2012).

### 2.3.2 *Le risque de carbon lock-in*

Une autre difficulté à surmonter pour la transition bas-carbone est le phénomène de *carbon lock-in* (UNRUH, 2000) ou *path dependency* qu'il va falloir éviter (WILSON et GRUBLER, 2011 ; FOUQUET, 2016a). La dépendance au sentier (*path dependency*) signifie que la trajectoire d'un système énergétique dépend fortement de ses conditions initiales en ce qui concerne les ressources, les institutions, les caractéristiques climatiques, géographiques, etc., et que ces éléments se perpétuent avec la mise en place de politiques spécifiques favorisant le régime existant (GRUBLER, 2009b). La plupart des pays dans le monde ont investi dans un ensemble d'infrastructures liées aux ressources fossiles. Celles-ci ainsi que les institutions, les réglementations et les pratiques sociales ont évolué conjointement depuis plus d'un siècle. Cette inertie économique, réglementaire et parfois sociale empêche et/ou rend très coûteux le changement du système carboné même si les conditions initiales associées à cet état actuel ne sont plus présentes.

Ce constat confirme la nécessité d'une action politique forte pour permettre le dépassement des intérêts économiques installés (WILSON et GRUBLER, 2011). Cependant, FOUQUET (2016c) met en garde les gouvernements contre de mauvais choix de stratégie énergétique qui pourraient par la suite empêcher le développement économique. Le choix des bons objectifs pour le pilotage de la transition énergétique de la part des gouvernements est essentiel pour ne pas se retrouver bloqué dans une trajectoire non compatible avec un monde bas-carbone. Plusieurs travaux récents du mouvement des *Sustainability Transitions* ont étudié comment la résistance au changement de la part des industries liées aux énergies fossiles avait pu être surmontée (TURNHEIM et GEELS, 2013, 2012 ; GEELS, 2014) et proposent des pistes de réflexion pour les éviter en insistant sur le rôle des politiques publiques et l'attractivité des visions alternatives du futur.

### 2.3.3 Une fenêtre d'action étroite

Comme souligné précédemment, les transitions dans le passé ont nécessité du temps, plusieurs décennies si ce n'est des siècles. Il est ainsi fort probable que la transition vers un système décarboné soit un processus très lent (FOUQUET, 2010). Pour SOLOMON et KRISHNA (2011), il est très peu probable que la transition se produise en moins de trois décennies. Pour respecter l'accord de Paris, les projections du GIEC (IPCC, 2018a) préconisent d'atteindre une neutralité carbone au niveau mondial dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Plusieurs pays développés ont donc annoncé des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050 : la Suède en 2045 (DARBY, 2017), la Norvège en 2030 (NESLEN, 2016)<sup>22</sup>, la France en 2050 (MTES, 2017) ainsi que dernièrement le Royaume-Uni en 2050 (EVANS, 2019). Cela laisse donc 30 ans pour modifier les systèmes énergétiques concernés ce qui est extrêmement court, et il est peu probable que l'évolution des émissions au niveau mondial respecte les recommandations du GIEC.

L'inertie des systèmes énergétiques est en effet très importante : une centrale nucléaire de dernière génération a une durée de vie prévue de 60 ans, les centrales à charbon ou à gaz de 25 à 30 ans. La transition représente donc un véritable défi d'autant plus qu'il peut exister un équilibre à trouver entre la vitesse de transition et le degré de transformation d'un système (WILSON et GRUBLER, 2011). Une diffusion rapide d'une technologie implique généralement qu'elle soit moins répandue. Laisser du temps à la transition énergétique rentre donc en contradiction avec l'objectif de rapidité impliqué par l'Accord de Paris pour limiter l'augmentation des températures à 1,5°C. Cependant, SOVACOOOL et GEELS (2016) considèrent que la transition bas-carbone pourra se produire rapidement si les conditions politiques sont réunies, c'est-à-dire si les pays sont guidés par un sens de l'urgence climatique et mettent en place une politique ambitieuse. En effet, un discours mettant en avant les bénéfices apportés par la transition concernant l'emploi, l'amélioration de la qualité de vie ou la protection de la nature peut gagner une légitimité au sein de la société civile. Mais force est de constater que ces discours n'ont pas encore produit le momentum désiré et que les émissions de GES ne diminuent pas.

### 2.3.4 Retour à une économie organique ?

Jusqu'à présent, les différentes transitions ont eu lieu dans le sens ressources renouvelables vers le non renouvelable (ARNOUX, 2015a). Avec la transition bas-carbone, le système énergétique doit aller vers

---

22. Cet objectif peut être notamment atteint grâce à des compensations internationales. Dans sa dernière communication nationale, l'objectif se traduit par une réduction de ses émissions de GES de 30 % en 2030 et de 80-95 % en 2050 par rapport à 1990 (NORWEGIAN MINISTRY OF CLIMATE CHANGE AND ENVIRONMENT, 2018).

des énergies décarbonées et suivre donc le sens inverse des précédentes transitions (PEARSON et FOXON, 2012). En effet, les transitions énergétiques ont permis aux sociétés de s'affranchir des contraintes de l'économie organique grâce au recours aux ressources fossiles. Avec la hausse de la consommation d'énergie fossile, cette limite a été (temporairement ?) dépassée puisque l'économie minérale ne dépend plus d'une production annuelle mais d'un stock d'énergie accumulé pendant des millions d'années. La transition bas-carbone qui fait référence principalement aux énergies renouvelables devra en quelque sorte de nouveau se confronter aux limites de ces contraintes organiques, en retournant à une économie organique. Les frontières de cette économie peuvent cependant être fluctuantes, comme celle qui concerne l'énergie nucléaire. Bien que n'appartenant pas à une économie organique, elle émet peu d'émissions de GES. Pour les partisans de cette énergie, son utilisation permet de se rapprocher d'une économie organique qui serait sinon trop contraignante.

Bien que dans certains pays la consommation d'énergie par habitant ait pu stagner ou légèrement décroître, la consommation totale continue d'augmenter. Or, il faudra réduire le recours aux énergies fossiles pour lutter contre le changement climatique. La transition énergétique vers un système décarboné doit donc inverser ce phénomène d'accumulation des énergies en diminuant le volume d'énergie fossile consommée tout en augmentant celui des énergies n'émettant pas de CO<sub>2</sub>. C'est donc une distinction importante avec les transitions passées : les nouveaux vecteurs énergétiques ne doivent plus s'additionner à ceux existants mais s'y substituer<sup>23</sup>. Pourtant, durant la première décennie du 21<sup>ème</sup> siècle, le monde a augmenté sa consommation d'énergies fossiles alors que le problème du changement climatique devenait plus prégnant et, selon SMIL (2016), la tendance ne s'inversera pas rapidement. En effet, « turning back to the organic economy is likely to be costly and impede growth and welfare » (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013). La transition énergétique bas-carbone doit donc à la fois aller dans le sens inverse de ce qui a été observé jusqu'à maintenant et diminuer la consommation d'énergie finale.

### 2.3.5 *Le rôle incertain de l'innovation technologique*

Les grandes transitions mondiales (biomasse vers charbon puis charbon vers pétrole et électricité) ont reposé sur l'exploitation de nouvelles sources d'énergie. La transition vers un système énergétique décarboné ne pourra probablement pas se faire grâce à l'exploitation d'une nouvelle source. Pour limiter les émissions de GES, il faut soit adapter le fonctionnement des systèmes énergétiques aux technologies

---

23. Si la consommation d'énergie totale n'a pas besoin en théorie de diminuer, en pratique le volume d'énergies renouvelables étant limité, il semble qu'il soit nécessaire de diminuer la consommation d'énergie de façon importante.

décarbonées existantes, soit en développer de nouvelles. Dans les deux cas, cela nécessite un soutien de la part des pouvoirs publics pour baisser leurs coûts et les rendre compétitives économiquement : soit en améliorant leur efficacité, soit en augmentant les économies d'échelle. L'amélioration de l'efficacité énergétique a également permis dans le passé de limiter l'augmentation de la consommation énergétique (GALES et al., 2007). Pour faire émerger de nouvelles technologies, les efforts de R&D doivent être renforcés. Ce soutien doit viser une large gamme de technologies pour avoir différentes options potentielles vis-à-vis de la sélection économique (WILSON et GRUBLER, 2011). Enfin, GRUBLER (2012) et WILSON (2012) mettent en garde contre une mise à l'échelle trop rapide des nouvelles technologies : le développement des innovations se déroule en plusieurs phases, ce qui demande du temps, en particulier les phases d'expérimentation et d'apprentissage.

Dans le passé, le changement d'énergie impliquait une reconfiguration du système énergétique (infrastructures, normes, régulations, institutions). De la même façon, la transition bas-carbone nécessite d'adapter les infrastructures existantes aux nouvelles technologies qui seront prédominantes dans le système énergétique. Outre la baisse des coûts, l'adoption de ces nouvelles technologies sera facilitée si elles offrent de nouveaux ou meilleurs services additionnels (propreté, efficacité, flexibilité, etc.). Il ne s'agit donc pas de substituer simplement une technologie par une autre mais également de mettre l'accent sur les services associés proposés : plus propre, meilleurs ou moins chers. Les innovations proposées ne sont cependant pas toujours bénéfiques (PEARSON, 2018), elles peuvent nous maintenir dans un *carbon lock-in* ou créer des problèmes qui n'avaient pas été anticipés.

#### 2.3.6 L'acceptabilité sociale

La problématique de l'acceptabilité sociale est également un nouveau défi à prendre en compte par rapport aux précédentes transitions. Selon SMIL (2013), « public acceptance and environmental considerations have become critical components in the conquest of new markets ». Ainsi pour HIRSH et JONES (2014), une des problématiques caractéristiques de la future transition est que les infrastructures qui auparavant étaient invisibles vont redevenir visibles. Un des exemples proposés est celui des lignes de transport d'électricité qui doivent être renforcées si on augmente la part d'énergies renouvelables intermittentes dans la production. Ces problèmes d'acceptabilité diffèrent suivant le contexte socio-culturel propre à chaque pays. Dans tous les cas, la transition bas-carbone s'accompagnera de transformations sociales et il faudra donc s'assurer que la transition soit équitable (FOUQUET, 2016a).

L'aspect social est souvent oublié dans les politiques publiques qui mettent plutôt en place des instruments économiques ou réglemen-

taires pour modifier les technologies sans s'assurer de leur équité. Mais pour SOVACOOOL et GEELS (2016), « socio-institutional processes will be crucial in low-carbon transitions besides techno-economic dimensions ». Ces aspects sont mis en avant dans le courant des *Sustainability Transitions* qui promeut un nouveau modèle de gouvernance des transitions avec le *Transition Management* (voir chapitre 5) en s'inspirant de l'analyse des transitions socio-techniques menées dans d'autres domaines que le système énergétique, comme dans le cas du déploiement d'égoûts (GEELS, 2006). Pour PEARSON (2018), la transition énergétique bas-carbone a ainsi tout à gagner à s'élaborer à partir de l'observation des transitions qui ont eu lieu dans des domaines relevant du bien public. Il cite comme exemple la mise en place d'approvisionnement en eau ou l'assainissement public dont la mise en œuvre a été favorisée par les bénéfices apportés non seulement à la société mais également aux acteurs privés.

## 2.4 CONCLUSION

De l'exploration du passé, nous nous sommes forgés la conviction que les transitions énergétiques qui se sont déroulées jusqu'à aujourd'hui sont très différentes de la transition énergétique bas-carbone que nous souhaitons mener dans le futur. Lorsque l'on parle de transition, on associe implicitement l'idée de substitution, de changement progressif d'un système basé sur un ensemble de ressources énergétiques à un autre. Or, les transitions énergétiques historiques sont caractérisées par une augmentation de la consommation d'énergie. Pour FRESSOZ (2014), les transitions historiques sont marquées par la persistance des anciens systèmes énergétiques dans les nouveaux témoignant d'une tendance à la superposition. Si toutefois, des substitutions ont bien eu lieu dans la consommation d'énergie, par exemple dans le chauffage résidentiel au cours de la révolution industrielle, les nouveaux usages ont également créé une demande supplémentaire en énergie. Les transitions énergétiques historiques associent donc à la fois des phénomènes de substitutions et d'accumulation.

Bien que le terme de transition soit maintenant utilisé communément, certains chercheurs le considèrent inapproprié. Son emploi dans la discipline est d'ailleurs récent, remontant à une dizaine d'années. Les révolutions industrielles ont ainsi été renommées rétrospectivement transitions tout comme d'autres modifications profondes de systèmes énergétiques nationaux (le nucléaire en France, les biocarburants au Brésil, etc.). Pour MASSARD-GUILBAUD (2018), le terme de transition est abusif, il faudrait plutôt parler de substitution ou de remplacement. Pour l'historien FRESSOZ (2018), l'expression est source de confusion pour les raisons déjà évoquées. On pourrait donc arguer que le terme de révolution semble plus à même de décrire certaines transitions passées. Et ce que nous avons à mener ne serait pas tant

une transition énergétique qu’une révolution énergétique : d’un certain point de vue, nous essayerions de revenir à une économie organique, de retourner à l’état d’origine d’où le terme de révolution. La transition énergétique bas-carbone serait alors le miroir de celle qui s’est déroulée lors de la révolution industrielle. Pour AYKUT, EVRARD et TOPÇU (2017), « le concept de transition énergétique sert souvent à séquencer le développement des différentes sources d’énergie et à expliquer les changements économiques et environnementaux subséquents » en masquant l’aspect révolutionnaire de ces changements. Cependant, il nous semble que la transition énergétique bas-carbone ne pourra être une révolution, elle est dépendante d’un héritage institutionnel et technologique que le terme de révolution a tendance à masquer. Nous rejoignons donc SOVACOOOL (2016) pour qui « most energy transitions have been, and will likely continue to be, path dependent rather than revolutionary, cumulative rather than fully substitutive ».

Le regard sur le passé nous a également amenés au constat que les moteurs des transitions sont multiples et se sont nourris les uns les autres : les innovations technologiques, les ressources, les aspects sociaux et politiques, et surtout, les facteurs économiques. Les transitions passées se sont déroulées pour la plupart spontanément car elles permettaient d’apporter des services nouveaux et moins chers (FOUQUET, 2010). Les bénéfices économiques ou les avantages concernant le confort de vie (par ex. lumière artificielle) ou l’augmentation des capacités de l’individu (par ex. transport grâce à la voiture ou chemin de fer) étaient indéniables. Les principales transitions énergétiques mondiales, c’est-à-dire les différentes révolutions industrielles, n’ont donc pas été dirigées et se sont déroulées spontanément. Les transitions contrôlées comme celle du secteur électrique en France ou du transport en Brésil étaient généralement commandées par un État qui y voyait des opportunités économiques que le marché n’était pas à même de provoquer et se sont limitées à un secteur. Les préoccupations environnementales n’étaient en tout cas pas une des motivations de la transition. FOUQUET (2012) montre ainsi que les changements provoqués pour diminuer la pollution ont eu lieu bien après le moment socialement optimal, sous des conditions économiques spécifiques (par exemple durant une période de croissance) et ont toujours été coordonnés par l’État.

Dans leurs analyses, les historiens axent principalement leurs observations sur les aspects techniques et économiques même s’ils reconnaissent l’importance des contextes sociaux et culturels. Ainsi, selon MASSARD-GUILBAUD (2018), certaines questions comme « qui décide des changements et dans quel but? », « qui possédait (les sources d’énergie, les convertisseurs, le pouvoir de les imposer aux autres)? », « quels changements ont-ils entraînés sur l’organisation sociale? » sont encore peu étudiées et gagneraient à être décryptées. Certaines de ces interrogations sont explorées par le courant des *Sustainability*

*Transitions* qui analyse les évolutions conjointes entre technologies, industries et institutions dans l'émergence des transitions (GEELS, 2002) mais ce travail reste marqué par une focalisation importante sur les technologies.

Les transitions énergétiques qui se sont déroulées dans le passé nous paraissent donc très différentes de la transition énergétique bas-carbone que nous souhaitons mener et pourraient n'apporter que des éléments limités à notre compréhension, en particulier concernant les structures institutionnelles puisque ces transitions n'étaient pas dirigées. Cependant, il nous semble que la transition bas-carbone attendue sera comme dans le passé composée de multiples transitions sectorielles, chacune dépendant de plusieurs paramètres différents avec des effets d'entraînement possibles entre les secteurs, par exemple grâce à la formation de *development block* (KANDER, MALANIMA et WARDE, 2013) si des innovations émergent. En effet, l'évolution d'un vecteur énergétique dans un secteur entraîne une baisse de ses coûts de production et sa diffusion dans d'autres secteurs.

Un point notable qui émerge de notre analyse est que la transition bas-carbone ne pourra avoir lieu spontanément au contraire des transitions passées. Pour SOVACOOOL et GEELS (2016), la transition ne sera pas provoquée par les opportunités économiques comme auparavant mais par la nécessité de résoudre des problèmes environnementaux. Cependant, cela pourrait alors impliquer une action trop tardive comme cela a été le cas dans le passé (FOUQUET, 2012). FOUQUET (2010) pense donc que les mêmes moteurs microéconomiques seront importants pour la future transition, c'est-à-dire que les services nouveaux et moins chers seront clés. La question des coûts est particulièrement cruciale : « climate policy is likely to be weak until low-carbon energy sources and technologies are competitive » (FOUQUET, 2016b). Cependant, une transition énergétique bas-carbone n'a pas obligatoirement vocation à accompagner une croissance économique. Son principal objectif est différent : la décarbonation du système énergétique au lieu de l'amélioration de l'efficacité ou de la performance économique. La transition ne pourra donc pas être guidée uniquement par des intérêts économiques. De nombreuses études essayent cependant de montrer les avantages économiques de faire une telle transition, qui serait bénéfique pour l'emploi mais aussi pour la croissance du PIB (pour la France, voir SAUSSAY et al., 2016 ; ADEME, 2013, 2016). Les projections des modèles IAM (*Integrated Assessment Model*) tendent d'ailleurs à montrer que sans action pour réduire les effets du réchauffement climatique, la croissance du PIB serait amoindrie (NORDHAUS, 1993 ; TOL, 1997 ; STERN, 2006). Mais ce résultat dépend fortement d'hypothèses liées à la forme de fonctions de dommage et au taux d'actualisation qui généralement ne sont pas prises en compte pour les calculs de rentabilité économique à court terme.

Concernant la transition énergétique bas-carbone, les historiens recommandent donc une action de la part des gouvernements pour diriger la transition vers l'objectif de décarbonation souhaité. Les moyens conseillés sont des outils classiques et bien connus : améliorer les structures de gouvernance des transitions, donner un prix au carbone, encourager les efforts de R&D, protéger les innovations technologiques, favoriser leur diffusion, etc. La transition énergétique bas-carbone doit ainsi apparaître intéressante d'un point de vue économique ou apporter des nouveaux services. Certaines de ces mesures ont commencé à être mises en place dans beaucoup de pays mais leurs effets ne se font pas encore pleinement sentir puisque les émissions de GES n'ont toujours pas diminué au niveau mondial (AFP, 2019). De plus, les aspects sociaux ne sont pas encore bien pris en compte dans les politiques publiques.

Il nous paraît donc important de souligner qu'au contraire des transitions historiques où il n'existait pas de pilotage ou alors un pilotage en boucle ouverte sans autre objet que l'expansion du système, la transition énergétique bas-carbone devra être contrôlée. Pour se démarquer des transitions historiques, le contrôle de cette transition énergétique bas-carbone doit être mis en place à travers des objectifs clairement identifiés dont la réduction des émissions CO<sub>2</sub>. Du statut d'observateur des changements passés, les gouvernements et les citoyens doivent passer à celui d'acteurs de la future transition énergétique en mettant en place un pilotage adéquat.

Pour réfléchir à la question du contrôle de la transition énergétique bas-carbone, nous explorerons dans la partie suivante les tentatives de contrôle qui ont été mises en place dans le cas de la France, en analysant les options qui y ont été et y sont envisagées.

Deuxième partie

LES TENTATIVES DE CONTRÔLE DE LA  
TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

## LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE DOMINÉE PAR DES INTÉRÊTS ÉCONOMIQUES

---

*Le nucléaire en France,  
le fuel ancré, enraciné.*

— Edouard Leurent & Ariane Millot

La France, elle aussi, proclame être sur la voie de la transition énergétique comme en témoigne la dernière loi relative au sujet au nom sans équivoque : Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). Dans ce chapitre, nous souhaitons réfléchir à la situation de la France par rapport à la transition énergétique. Tout d'abord, nous reviendrons sur l'évolution de la politique énergétique française. Jusqu'à aujourd'hui, cette dernière a principalement été motivée par des intérêts économiques et l'indépendance énergétique. La seule transition énergétique que la France ait connue depuis les années 1970 est celle qui s'est produite dans le secteur de l'électricité avec le déploiement du nucléaire. La politique énergétique a toutefois progressivement incorporé les thématiques liées à l'environnement et, ces dernières années, celles liées au problème du réchauffement climatique. La France a en ce sens adopté des objectifs ambitieux visant à initier une transition énergétique vers un système décarboné et qui concerne cette fois-ci l'ensemble des secteurs du système énergétique. Elle a mis en place un ensemble de mesures de politiques publiques ainsi qu'un pilotage de ce processus à travers la publication de documents stratégiques et l'établissement de comités chargés de surveiller et conseiller l'administration. Pour autant, l'évolution du système énergétique ne semble pas indiquer que la France ait réellement engagé une transition énergétique bas-carbone mais qu'elle se trouve plutôt dans une situation semblable à une trajectoire de *reproduction process* pour reprendre la typologie de GEELS et SCHOT (2007), c'est-à-dire dans un processus de dynamique stable avec des améliorations à la marge.

### 3.1 UNE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE MARQUÉE PAR LE NUCLÉAIRE

La politique énergétique est un élément central dans un programme de lutte contre le changement climatique puisque les émissions associées au système énergétique représentent une part prépondérante du total, environ 80 % en Europe et au niveau mondial. Afin d'expliquer

en partie la structure du système énergétique actuel, nous revenons sur les principaux éléments de la politique énergétique française depuis 1970. Nous nous focalisons uniquement sur les énergies n'émettant pas de CO<sub>2</sub> puisque ce sont ces énergies qui contribuent à la décarbonation du système énergétique et donc à la transition énergétique telle que nous l'avons définie précédemment (voir [chapitre 1](#)).

### 3.1.1 Nucléaire : un programme technocratique

En France, les recherches sur l'énergie nucléaire ont débuté juste après la fin de la Seconde Guerre mondiale en 1945, avec la création du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pour aboutir en 1956 à la construction du premier réacteur nucléaire de technologie UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz, une technologie de réacteur refroidi au dioxyde de carbone et modéré au graphite) d'une puissance de 2 MW. Au cours des années 1960, plusieurs réacteurs nucléaires expérimentaux sont construits. En 1969, après l'abandon de la conception française UNGG pour un réacteur à eau pressurisée de Westinghouse, débute la phase d'industrialisation avec le lancement d'un premier ensemble de contrats : le lot CPO avec 6 réacteurs commandés dont la construction débute en 1971 (BOCCARD, 2014 ; GRUBLER, 2009a).

Le véritable renforcement de ce programme nucléaire a lieu après la crise pétrolière de 1973. En avril 1973, avant le début de la crise en octobre, une commission conseille au gouvernement d'accélérer le programme nucléaire, prévoyant qu'une puissance de 200 GW serait nécessaire dans les années 2000. Ces prévisions seront ensuite révisées à la baisse avec l'estimation en 1982 d'un besoin de 86 GW en 2000 (DEBEIR, DELÉAGE et HÉMERY, 2013). Le gouvernement Messmer accepte le plan nucléaire en mars 1974 et multiplie les commandes les années suivantes : 18 réacteurs en 1974, suivis de 18 autres unités à la fin de 1975, de 12 réacteurs en 1980 et de 4 en 1984 (FINON et STAROPOLI, 2001 ; GRUBLER, 2010).

Comme le soulignent FINON et STAROPOLI (2001) et GRUBLER (2010), ce programme nucléaire de grande envergure est fortement soutenu par l'élite technocratique avec notamment les ingénieurs regroupés dans les corps d'État (Corps des Mines et Corps des Ponts et chaussées), qui coordonnaient le programme entre le gouvernement français et les institutions en charge du déploiement des centrales nucléaires, la compagnie d'électricité publique EDF et le CEA. Ce soutien institutionnel très centralisé a été un facteur clé de la réussite du programme nucléaire puisqu'il a garanti la stabilité du cadre réglementaire en mettant à l'écart le processus de prise de décisions de l'« arène politique » (FINON, 1996). Cette transformation rapide du secteur électrique est souvent citée comme exemple de transition rapide et courte (SOVACOO, 2016 ; SMIL, 2010a). Outre le soutien institutionnel, les autres raisons expliquant cette rapidité sont la construction d'un seul type de ré-

acteur, l'appel à un seul constructeur, un lien étroit entre EDF (le constructeur) et COGEMA (le concepteur des réacteurs) ce qui a permis des économies d'échelles importantes.

L'objectif déclaré de ce programme nucléaire était d'assurer l'indépendance énergétique de la France après le choc pétrolier. Cependant, une forte ambition existait déjà avant la crise pétrolière comme en témoignent la date de démarrage du programme de recherche sur le nucléaire ainsi que les recommandations de la commission Péon (Production d'Électricité d'Origine Nucléaire) qui regroupait, depuis 1955, plusieurs hauts cadres de l'administration, de la recherche et des dirigeants d'industries. L'emploi, les perspectives économiques et le renforcement de la France sur la scène internationale sont autant d'autres raisons qui ont incité l'État à soutenir le développement de l'énergie nucléaire. L'objectif d'indépendance énergétique était présent depuis le début de la modernisation du système énergétique français : pour MEYER (2017c, voir p.20), le choix du nucléaire était perçu comme un moyen de reconstruire l'identité française après la guerre et d'éviter une pénurie de ressources en France. La crise pétrolière a renforcé la légitimité de cet objectif et a accéléré le déploiement de la filière (RENARD, 2017).

### 3.1.2 *Remettre en cause le nucléaire ?*

Ainsi, en France, le soutien principal de la filière est venu de l'élite, soucieuse de renforcer l'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement du pays. Le bénéfice lié à la faible empreinte carbone de l'énergie nucléaire ne faisait à l'origine pas partie des motivations pour le soutien de son développement même si cet argument a ensuite été avancé par les industriels dans les débats de politique énergétique. Au contraire, la majorité des associations environnementales n'a jamais soutenu le développement de cette technologie et a présenté l'augmentation d'événements météorologiques extrêmes liés au changement climatique comme une menace pour cette énergie (MEYER, 2017b). Malgré cette opposition, les contestations et les mouvements citoyens de protestations ont été peu nombreux lors de la construction des centrales nucléaires (BELTRAN, 2015).

Au sein des partis politiques, à l'exception du parti Vert, la nécessité du recours à l'énergie nucléaire a généralement fait consensus jusqu'au début des années 2010, ce qui a contribué à la stabilité de la politique nucléaire française. Ce soutien s'interrompt cependant en 2012 lors de l'élection du président Hollande qui s'engage à réduire la part du nucléaire conformément à l'accord mis en place avec le parti Vert. Ce changement politique déclenche de nombreux débats quant à la place du nucléaire en France entre les partisans d'une baisse rapide des capacités installées et ceux qui souhaitent prolonger la durée de vie des centrales ou construire de nouvelles unités. La question nucléaire

monopolise aujourd'hui les débats sur la transition énergétique au détriment d'autres questions telles que la rénovation énergétique des bâtiments ou l'évolution du secteur des transports. Les trois principales positions concernant le nucléaire sont les suivantes : la sortie rapide et complète de l'énergie nucléaire, le maintien de l'objectif actuel de réduction de la part du nucléaire dans le bouquet énergétique à 50 % d'ici 2035 et le recours à l'énergie nucléaire (ARDITI et al., 2013 ; MAÏZI et ASSOUMOU, 2014).

Depuis la promulgation de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) en 2015 dont un des objectifs est de ramener la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % en 2025, la mise en œuvre de la fermeture des centrales avec un calendrier spécifique est reportée chaque année à la suivante ou au prochain gouvernement. Ainsi, la date de l'objectif a d'abord été reportée de 2025 à 2030 (EURACTIV.FR et AFP, 2017) puis plus récemment à 2035 (WAKIM, 2018). Dans la dernière Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), le gouvernement prévoit de fermer 14 centrales nucléaires mais sans préciser lesquelles ni à quel rythme. Le calendrier n'est pas précisé car le gouvernement souhaite attendre le rapport de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui autorisera ou non pour chaque centrale le prolongement de leur durée de vie à condition que des travaux de rénovation soient engagés. Plusieurs raisons expliquent le retard dans la réalisation de cet objectif. Le parc nucléaire français a été construit sur une période de temps très courte ce qui entraîne la diminution rapide de ses capacités d'ici 2030. Pour y faire face, le gouvernement a plusieurs options : la prolongation de la durée de vie de certaines centrales (qui passerait de 40 à 50 ou 60 ans) sous réserve de validation par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), le lancement de la construction de nouvelles centrales ou le déploiement massif de capacités renouvelables qui viendrait compenser la baisse des capacités nucléaires. Toutes ces options sont défendues par différentes parties prenantes (ADEME, 2016, 2018b, 2015 ; NÉGAWATT, 2017 ; RÜDINGER, COLOMBIER et al., 2017 ; RTE, 2017a ; UFE, 2018 ; SFEN, 2018) et l'ensemble de leurs conséquences, aussi bien économiques que sociales, sont difficiles à évaluer. Sans mentionner les discussions autour de la fermeture de la centrale de Fessenheim, le gouvernement doit également faire face au retard de la mise en service de la centrale de Flamanville, dont la construction a débuté en 2007. Entre la première discussion autour du lancement d'une nouvelle centrale nucléaire en 2002 et la mise en service prévue en 2022 (LE HIR et WAKIM, 2019), près de 20 ans se seront écoulés. Le futur du nucléaire demeure ainsi soumis à de nombreuses incertitudes.

### 3.1.3 *Les énergies renouvelables électriques*

Les énergies renouvelables électriques comprennent l'électricité hydraulique, biomasse, éolienne et solaire. Le parc hydraulique a été construit au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, en pleine phase de reconstruction, portée par la croissance des besoins et la recherche d'indépendance énergétique. La plupart des sites pouvant être équipés de barrages l'ont été entre 1945 et 1970. Après 1970, les politiques publiques concernant l'hydroélectricité ont donc été limitées. Les principales évolutions qui se sont produites dans ce secteur sont l'amélioration du rendement des turbines et la meilleure prise en compte de l'environnement dans l'exploitation des barrages (avec par exemple l'instauration de débit réservé). Alors que les recherches menées en France dans le domaine des énergies éoliennes et solaires sont restées limitées, des mesures d'incitation sont mises en place à partir des années 2000 pour favoriser leur déploiement avec notamment des tarifs garantis de rachat. Il faudra toutefois attendre le soutien massif aux énergies renouvelables de l'Allemagne et de la Chine pour voir leur prix réellement chuter à partir de 2010 (KAVLAK, McNERNEY et TRANCIK, 2018 ; IRENA, 2019). Ainsi, depuis le milieu des années 2000, on observe une progression régulière de l'installation des capacités éoliennes terrestres et photovoltaïques en France. En 10 ans, entre 2008 et 2018, les capacités françaises sont passées de 3 à 15 GW pour l'éolien et de 0 à 8,5 GW pour le solaire (RTE, 2019).

#### 3.1.4 *La biomasse, une énergie au potentiel sous-exploité*

En France, la biomasse provient principalement (environ 70 %) de l'industrie forestière, qui couvre environ 33 % de la superficie du territoire. Le bois énergie est principalement utilisé dans le secteur résidentiel par les poêles à bois. Principale puissance agricole en Europe, la France bénéficie d'un potentiel important de biomasse d'origine agricole qui est principalement utilisée pour les biocarburants et depuis quelques années, pour la production de biogaz. Cependant, le manque de vision stratégique de l'utilisation de cette biomasse a freiné son développement (LE DÉAUT, COURTEAU et SIDO, 2016).

Aussi et bien que la biomasse représente une part significative de la consommation d'énergie renouvelable en France grâce au bois-énergie (39 % selon le SDES (2018a)), peu de mesures ont été mises en place pour favoriser son déploiement. Après 1970, l'utilisation de la liqueur noire pour la production d'électricité a augmenté dans l'industrie papetière mais la consommation de bois-énergie pour la chaleur des bâtiments résidentiels est resté stable. Avec le Grenelle de l'environnement en 2009, de nouvelles mesures ont été adoptées. La principale incitation mise en place est le Fonds Chaleur, un fonds d'aide au développement de la production et de la distribution de

chaleur renouvelable géré par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Il est destiné aux logements collectifs, aux collectivités et aux entreprises. L'utilisation de biogaz pour la production d'électricité et de chaleur est également soutenue par une obligation d'achat pouvant durer de 15 à 20 ans en fonction des secteurs et de leur degré de maturité, tandis que l'utilisation des biocarburants est soutenue par une exonération fiscale (HUGUES, 2015).

### 3.1.5 *Le chauffage urbain, un développement limité au profit du chauffage électrique*

Le premier réseau de chaleur (système de chauffage urbain) a été mis en place à Paris avec la création de la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain) en 1927. D'autres systèmes ont été installés dans des grandes villes comme Grenoble ou Strasbourg dans les années 1930 mais leur développement a réellement décollé entre les années 1950 et 1970, principalement dans les grandes villes avec la croissance de l'urbanisation. Les crises pétrolières de 1973 et 1979 ont déclenché une nouvelle phase d'expansion des réseaux de chaleur. De nouveaux systèmes ont été construits et certains systèmes existants ont été modifiés pour utiliser l'énergie géothermique, en particulier dans la région Île-de-France (CEREMA, 2012). Leur nombre et leur développement sont cependant restés limités. Les réseaux de chaleur représentent aujourd'hui 6 % de la consommation de chaleur résidentielle et tertiaire (AMORCE, 2016).

Les réseaux de chaleur ont consommé principalement du charbon entre les années 1950 et 1970 et sont ensuite passés au gaz. Aujourd'hui, leur approvisionnement en énergie provient pour près de la moitié des énergies renouvelables et de l'autre du gaz et des autres combustibles fossiles (AMORCE, 2016). Les réseaux se situent principalement dans le nord et l'est de la France en raison, entre autres, du climat plus froid, de la densité de population et de la présence de grandes agglomérations (CEREMA, 2016).

La France n'a pas particulièrement encouragé le développement des réseaux de chaleur car l'électricité était très compétitive par rapport au coût de la chaleur en raison des surcapacités de production d'énergie nucléaire. En outre, le climat tempéré et les saisons de chauffage relativement courtes ne favorisent pas non plus leur installation. Les municipalités n'étaient donc pas intéressées par leur développement (CASSITTO, 1990). Au début des années 2000, l'intérêt porté aux réseaux de chaleur se renouvelle et des incitations sont mises en place comme en 2006 avec l'instauration d'une TVA réduite pour les réseaux utilisant plus de 60 % d'énergies renouvelables (PWC, 2018) suivie de la création du Fonds Chaleur en 2009 qui a favorisé le développement des réseaux de chaleur utilisant de l'énergie géothermique ou de la biomasse.

Ainsi, à cause des surcapacités nucléaires, EDF, soutenu par le gouvernement, a mené des campagnes dans les années 1980 pour promouvoir l'utilisation de l'électricité et en particulier dans les nouveaux logements du secteur résidentiel : le slogan « tout nucléaire tout électrique » résume ce positionnement (BOURGEOIS, 2015). Ces incitations ont conduit au déploiement important du chauffage électrique (FINON, 1996). Le système électrique français est donc maintenant très sensible à la variation de la météo puisqu'une variation de 1°C entraîne un appel de puissance de l'ordre de 2,4 GW (RTE, 2017b).

### 3.2 UNE CONVERGENCE PROGRESSIVE DES THÉMATIQUES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉNERGIE

La politique énergétique française a été influencée par de nombreux facteurs, principalement géopolitiques et économiques. Ce travail n'a pas pour objet une analyse fine de l'ensemble des éléments influençant la politique énergétique française mais nous retracerons brièvement son histoire pour mieux comprendre comment la transition énergétique est devenue un objectif de premier plan pour la politique énergétique actuelle.

La politique énergétique française peut se retracer selon les phases suivantes :

- 1945-1970 : politique axée sur la croissance de l'énergie
- 1970-1990 : politique axée sur l'indépendance énergétique
- 1990-aujourd'hui : politique cherchant un équilibre entre les enjeux économiques et la montée des préoccupations environnementales.

Par ailleurs, si la politique énergétique était uniquement décidée dans un cadre national jusque dans les années 1970, elle est désormais en partie définie au niveau de l'Union européenne (UE) ainsi que par les engagements pris dans le cadre de la Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Elle doit donc être analysée suivant trois échelles : l'échelle mondiale où se déroule les négociations climatiques, l'échelle européenne et enfin, l'échelle nationale.

#### 3.2.1 *L'État face à la croissance énergétique*

Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, la France connaît une croissance économique importante, les Trente Glorieuses. Avec la reconstruction et le développement du pays, la consommation d'énergie française a rapidement augmenté, en particulier celle du pétrole suivant la démocratisation du transport routier. Les ressources énergétiques fossiles de la France sont limitées ce qui la conduit à importer une grande partie de son énergie malgré l'essor de l'exploitation de

ses ressources charbonnières nationales qui atteint un pic de près de 60 Mt vers 1960 (SEYER, 1980). Les importations atteignent autour de 75 % de sa consommation d'énergie primaire dans les années 1970.

Depuis la révolution industrielle, le gouvernement, soucieux de son indépendance énergétique, a joué un rôle de plus en plus important dans la politique énergétique, notamment avec la création d'entreprises nationales dont la Compagnie française des pétroles en 1924. Son implication se confirme avec la nationalisation des entreprises d'électricité, de gaz et de charbon après la Libération (BELTRAN, 2015). La période de l'après-guerre correspond également au développement important de barrages hydrauliques et à la découverte du gisement de gaz à Lacq en 1951 qui permettent de soutenir la politique d'indépendance énergétique. Lacq fournit jusqu'à la fin des années 1970 entre 6 et 7 Mtep de gaz par an (SEYER, 1980) sur une consommation d'énergie primaire d'environ 150 Mtep en 1970. Les importations augmentent progressivement à partir de 1970 et dépassent pratiquement le niveau de la production nationale dès 1972. Toutefois, l'augmentation de la consommation de gaz a été plutôt limitée car GDF (Gaz de France, l'entreprise publique en monopole sur le gaz) subissait à la fois la concurrence d'EDF et des intérêts pétroliers mieux défendus. Pour le pétrole, la France a fortement privilégié les entreprises françaises sur le marché national et encouragé la fusion d'entreprises avec comme objectif de contrôler une production de pétrole en quantité égale à sa consommation (FINON, 1996) en s'appuyant notamment sur les réserves du Moyen-Orient (SEYER, 1980). L'achat de charbon est centralisé pour limiter la dépendance et protéger la production nationale (FINON, 1996). Cependant, à cause de la faible rentabilité de son exploitation en France, le gouvernement engage des plans de restructuration de la filière charbon à partir de 1960. D'importantes grèves nationales le conduisent néanmoins à relancer et soutenir la production (FINON, 1996). Malgré ce soutien, à partir de 1960, l'augmentation de la consommation d'énergie est principalement satisfaite par des importations de pétrole.

### 3.2.2 *Un État soucieux de l'indépendance énergétique*

Le début des années 1970 est marqué par plusieurs événements. Les thématiques environnementales prennent de l'importance avec la création du ministère de l'Environnement en 1971 avec Robert Poujade sous la présidence de Pompidou. Comme le fait remarquer Jacques Theys (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a), cette création précède la conférence de Stockholm et la publication du rapport du Club de Rome qui ont lieu en 1972. La France est l'un des premiers pays à mettre en place un ministère de l'Environnement et apparaît donc précurseur sur ces sujets. Les premières missions durant les décennies 1970 et 1980 sont consacrées uniquement à des thématiques liées à des

pollutions locales ou régionales comme la qualité de l'eau, l'eutrophisation des lacs ou encore la pollution atmosphérique (LACROIX et ZACCAÏ, 2010; POUJADE et FRIOUX, 2012). Cette période correspond à une phase d'institutionnalisation de l'environnement selon LACROIX et ZACCAÏ (2010) avec un étoffement progressif du budget du ministère et de ses services dont par exemple la mise en place de directions régionales et départementales. La gestion de certaines problématiques rentre parfois en compétition avec celles des grands corps technocratiques comme le Corps des Ponts et chaussées, du Génie rural, des eaux et des forêts ou des Mines dont certains sujets ont un lien avec l'environnement. La première décennie d'existence est celle « d'un ministère faible dans un État fort » (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a) mais son fonctionnement se consolide par la suite tout en s'adaptant à la réduction du rôle central de l'État. Les risques liés au changement climatique ne font pas encore consensus au sein de la communauté scientifique et ne font donc pas l'objet de réponse institutionnelle mais cette création d'un ministère de l'Environnement témoigne d'une « émergence de l'environnement comme problème politique » (LACROIX et ZACCAÏ, 2010). La protection et la défense de l'environnement sont également considérées comme « une opportunité pour l'industrie » (POTTIER, 2014).

En 1973 survient la première crise pétrolière alors que la consommation de pétrole représente 67 % de l'énergie primaire totale. Cet événement renforce les préoccupations de l'État vis-à-vis de l'indépendance énergétique et entraîne un renforcement de sa politique énergétique. Les trois objectifs de la politique énergétique française sont alors l'indépendance énergétique, la sécurité d'approvisionnement et la compétitivité des coûts (REVOL, 1998). Comme indiqué précédemment, pour répondre à ces objectifs, la France lance un important programme nucléaire (voir sous-section 3.1.1). Le gouvernement tente également de diversifier ses sources d'approvisionnement en pétrole et en gaz, en réduisant par exemple la part du pétrole provenant du Moyen-Orient (REVOL, 1998). Le réseau gazier a également été étendu ce qui s'inscrivait dans la continuité de son développement depuis la découverte d'une ressource gazière en 1951 à Lacq.

Une autre réponse à la crise pétrolière a été la mise en place d'une politique de maîtrise de l'énergie. En 1974, le Parlement adopte des mesures visant à réduire la consommation d'énergie en instaurant le changement de l'heure été/hiver et des limites de vitesse pour les automobiles (CHASSERIAUX, 1983). Des programmes de recherche et de promotion des énergies renouvelables sont également lancés pour le chauffage géothermique, l'énergie solaire, la récupération de chaleur et les biocarburants. L'État créé également une Agence pour les économies d'énergie (AEE) en 1974 afin de contrôler et de réduire la consommation d'énergie - en particulier le pétrole - et de mener une politique de recherche sur les technologies de maîtrise de

l'énergie (VIRLOUVET, 2015). Les résultats de l'Agence sont positifs au début de sa création avec des campagnes d'efficacité énergétique et des incitations pour les industries, mais la baisse des prix du pétrole, en particulier dans les années 1980 et 1990, et le développement de l'énergie nucléaire réduisent la nécessité de contrôler la consommation d'énergie. Tous les efforts déployés pour des mesures d'efficacité énergétique sont alors rapidement réduits. Après 1986, les soutiens financiers à l'AFME (Agence française de la maîtrise de l'énergie, remplaçant de l'AEE) diminuent fortement bien que ses effets aient été globalement positifs (FINON, 1996).

En effet, la construction de centrales nucléaires a conduit à une situation de surcapacité qui sera reconnue en 1983 avec l'élaboration du neuvième plan de politique énergétique sous l'égide du Commissariat général du Plan (FINON, 1996). Pour s'adapter à cette situation, le gouvernement encourage alors EDF à augmenter ses exportations d'électricité et à trouver de nouveaux débouchés pour cette énergie. Ceux-ci sont alors limités au sein du secteur industriel à cause du manque de compétitivité de l'électricité, mais les secteurs résidentiel et tertiaire permettent une diffusion de l'utilisation de ce vecteur grâce notamment au chauffage électrique. La plupart des nouveaux logements optent de fait pour cette technologie plus économique, ce qui se ressent jusqu'à aujourd'hui puisque que le chauffage électrique représente 36 % du parc de logement en 2016 (CEREN, 2018a). Cette préférence a toutefois permis de limiter l'expansion du chauffage gaz et donc de modérer dans une certaine mesure l'augmentation des émissions.

Le rôle de l'État est prépondérant dans la politique énergétique française jusqu'aux années 1980. Il s'exerce via un contrôle étatique important que ce soit dans le secteur du pétrole avec le soutien des firmes françaises contrôlant le marché, dans celui du charbon avec le contrôle des importations pour assurer la sécurité de la production nationale ou sur la filière nucléaire avec la construction de nombreuses centrales et la mise en place d'un Service central de sûreté des installations nucléaires (SCSIN), ancêtre de l'ASN (FINON, 1996). Toutefois, à partir du milieu des années 1980, la politique énergétique ne fait plus partie des priorités du gouvernement alors même que les thématiques environnementales commencent à prendre de l'importance.

### 3.2.3 *L'institutionnalisation du changement climatique*

Au début des années 1990, la montée des préoccupations envers le changement climatique au niveau de la scène internationale réoriente la politique énergétique française. Après la création du GIEC en 1988 et la parution de leur premier rapport en 1990<sup>1</sup>, l'accord

---

1. Dans ce premier rapport, il n'est pas clairement établi que le CO<sub>2</sub> d'origine anthropique est la cause de l'augmentation de la température globale.

sur la Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est signée en 1992 lors du sommet de Rio. Il « marque la mise en place du régime climatique<sup>2</sup> sous la houlette onusienne » (AYKUT et DAHAN, 2014b, chap. 1). Des conférences climatiques annuelles (les COP, conférences des parties) sont instituées pour favoriser la coopération mondiale sur le climat. En 1997, lors de la COP 3 au Japon, est adopté le protocole de Kyoto qui fixe des objectifs de réduction d'émissions mais uniquement pour les pays développés<sup>3</sup>. Au niveau européen, l'Union européenne s'engage tout d'abord lors de la mise en place de la CCNUCC à stabiliser ses émissions entre 1991 et 2000 puis dans le cadre de Kyoto, à réduire ses émissions de 8 % sur la période 2008-2012 par rapport à leur niveau de 1990.

En France, la Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES) est créée en 1992 et a pour mission de coordonner l'action de la France dans sa lutte contre les émissions de GES (VIRLOUVET, 2015). De petite taille, ses effectifs atteignent une dizaine de personnes au début des années 2000. Alternativement placée sous l'autorité du Premier ministre et du ministère de l'Environnement, elle sera finalement fusionnée à la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) en 2008 et rattachée au ministère de l'Écologie.

Dans un premier temps, son action est limitée. Jusqu'en 1997, « la France n'affiche pas un volontarisme sur le sujet climatique », elle est d'ailleurs réticente à « mettre en place des mesures dont le coût pourrait être important alors que l'État considère que des efforts ont déjà été accomplis par rapport aux autres pays européens » et « est défavorable à la fixation d'objectifs quantifiés de réduction des émissions de GES en plaidant pour une action au niveau international » (VIRLOUVET, 2015). Le protocole de Kyoto marque un engagement plus fort de la France qui s'implique davantage dans les négociations et pousse pour des objectifs plus ambitieux. En 1998, un accord est trouvé au niveau européen sur le « partage du fardeau » (*burden sharing*), c'est-à-dire sur une répartition de l'objectif de réduction de 8% des émissions de GES pris par l'Union européenne dans le cadre du protocole de Kyoto. Dans ce cadre, la France s'engage à maintenir ses émissions constantes par rapport à 1990.

À partir de 1998 se met en place une réflexion sur les mesures à instaurer pour respecter les engagements de la France, ce qui aboutit à l'adoption d'un Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) en 2000. Cette première réponse institutionnelle pour lutter contre le changement climatique ne comporte pas vraiment de nouvelles mesures par rapport aux précédentes propositions d'avant 1997. Son impact est faible car la plupart des mesures annon-

---

2. Le régime climatique comprend l'ensemble des institutions, des systèmes d'acteurs (scientifiques, politiques, économiques ou des ONG), les instruments économiques ou juridiques associés et leurs relations.

3. Plus précisément, ce sont les pays listés dans l'Annexe 1 qui regroupe les membres de l'OCDE et les pays de l'ancien bloc de l'Est (ex-URSS).

cées dans le plan ne seront pas adoptées, notamment les mesures de taxation de l'énergie (VIRLOUVET, 2015). Cependant l'enjeu climatique stricto-sensu devient plus présent.

Dès 2003, la préparation du Plan Climat commence pour faire suite au PNLCC de 2000 et est adopté en 2004. Il doit répondre à la fois aux besoins de planification nationale mais aussi aux exigences de compte-rendu auprès de l'Union européenne (VIRLOUVET, 2015). Il cherche à renforcer les mesures de lutte contre le changement climatique avec par exemple l'instauration du bonus-malus dans le secteur du transport ou la mise en place des plans climats territoriaux. En parallèle, en 2005 est adoptée la loi Programme d'orientation de la politique énergétique (POPE) dite « Facteur 4 ». Elle fixe comme objectif de diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990 et d'améliorer l'efficacité énergétique de 2 % par an dès 2015<sup>4</sup>. Cette loi introduit donc deux éléments novateurs, un objectif de long terme pour les émissions et un objectif d'efficacité énergétique. Une réflexion est engagée sur la décomposition sectorielle de cet objectif avec la mise en place d'un Comité Énergie pour évaluer des trajectoires à moyen et long terme, c'est-à-dire à horizon 2020 et 2050 (SYROTA et CENTRE D'ANALYSE STRATÉGIQUE, 2008). Ces objectifs sont confirmés plus tard lors du Grenelle de l'environnement en 2007.

La politique climatique se compose de deux volets : atténuation et adaptation. Pour ce second volet, l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) est créé en 2001. Pour la partie atténuation, il y a jusqu'en 2008 une séparation entre les enjeux énergétiques traités par la DGEMP et les questions liées au climat dont s'occupe la MIES même si elle se focalise principalement sur les aspects énergétiques. La politique environnementale s'inscrit quant à elle dans le cadre du développement durable qui est adopté comme objectif directeur avec la loi Barnier en 1995 (LACROIX et ZACCAÏ, 2010). En 2007, une fusion du ministère de l'Environnement et du ministère des Transports et de l'Équipement a lieu, notamment sous la pression de la société civile et de la Fondation Nicolas Hulot pour créer le ministère de l'Écologie et du Développement durable (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a). Puis en 2008, la réorganisation des services rattachés au ministère entraîne la fusion de la DGEMP du ministère de l'Industrie et de la MIES qui aboutit à la création du département de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC). Cette étape marque le début d'une approche plus intégrée des questions énergie-climat, prolongée récemment avec l'introduction des problématiques liées à la pollution de l'air. Cette réorganisation permet ainsi de rapprocher politique climatique et politique environnementale.

L'institutionnalisation du développement durable s'est donc transformée relativement rapidement puisque dès 2012 le terme de tran-

---

4. On peut noter la formulation « dès 2015 » alors que cet objectif renvoie à 10 ans plus tard.

sition énergétique est adopté. Selon Jacques Theys (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a), « le développement durable est, de fait, "mis de côté" et remplacé en 2012 par le terme, prometteur, mais encore à définir, de "transition écologique" ». L'institutionnalisation de la notion de transition énergétique est également actée par la tenue du Débat national sur la transition énergétique (DNTE) qui ne permet toutefois pas de lever l'ambiguïté sur la notion, chaque acteur y retrouvant son interprétation et sa vision (AYKUT et EVRARD, 2017).

À partir de 2007, l'enjeu énergétique est de mieux en mieux pris en compte dans la politique climatique. La France change graduellement d'approche dans sa politique énergétique (ANDRIOSPOULOS et SILVESTRE, 2017). D'une part, lors de la campagne présidentielle se renforce l'idée d'une conception transversale de l'environnement (VIRLOUVET, 2015). D'autre part, lors du Grenelle de l'environnement qui réunit différentes parties prenantes pour définir des objectifs en matière d'environnement et de développement durable, les enjeux climat-énergie sont centraux. Ces débats aboutissent à l'adoption de deux lois Grenelle 1 et 2 (2009 et 2010) qui détaillent les objectifs sectoriels de la mise en œuvre de la politique de lutte contre le changement climatique. De nouveau, de nombreuses mesures des précédents Plans Climats qui n'avaient pas été appliquées sont récupérées et intégrées. En outre, le contenu des lois Grenelle est en grande partie dicté par le besoin de mise en conformité avec les textes européens (LACROIX et ZACCAÏ, 2010). Toutefois, la politique climat s'intègre plus souvent au sein d'autres politiques publiques. Par ailleurs, elle n'aborde pas uniquement le secteur de l'énergie mais les autres enjeux environnementaux et est plus inclusive. Le Grenelle relance par ailleurs la réflexion sur l'introduction d'une taxe carbone même si la tentative suite au projet de loi de Finances est refusée par le Conseil constitutionnel.

Enfin, en 2012 débute le DNTE qui mobilise à nouveau diverses parties prenantes, experts, représentants de l'État, membres d'associations et citoyens. Les débats s'appuient sur deux piliers : le « Facteur 4 » pour les émissions de GES et la part relative du nucléaire et des renouvelables dans le mix électrique. La réduction de 75 % des émissions de GES en 2050 par rapport à 1990 s'inscrit dans la continuité de l'objectif de la loi POPE tandis que la réduction de la part du nucléaire dans le mix électrique (de 75 % en 2015 à 50 % en 2025) correspond à l'engagement de campagne du président Hollande. À l'issue du débat est votée la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) que nous avons déjà évoqué et sur laquelle nous reviendrons en [sous-section 3.3.1](#).

Cette loi s'inscrit pleinement dans le paradigme de la modernisation écologique<sup>5</sup>. En effet, le concept de croissance verte<sup>6</sup> qui avait fait son apparition lors du Grenelle de l'environnement est repris comme principal objectif de la loi. L'objectif de la croissance économique reste donc le principal indicateur des performances des politiques publiques. L'environnement et les thématiques écologiques sont vues comme porteuses de croissance. Il n'y a donc pas de remise en cause fondamentale du mode de développement. Dans cette optique, il apparaît donc difficile de vouloir modifier les modes de vie. La politique énergétique est en effet marquée par une faible préoccupation envers les actions visant la maîtrise de la demande énergétique. Ainsi, les politiques publiques cherchant à changer certains comportements restent pour l'instant marginales. Plus généralement, les mesures qui sont promues au sein du ministère se focalisent le plus souvent sur l'offre et l'aspect technologique, et moins sur les demandes de service énergétique.

### 3.3 OBJECTIFS ET GOUVERNANCE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

La transition énergétique vers un système décarboné fait aujourd'hui partie des objectifs officiels de la politique énergétique française. Ses objectifs ont toutefois évolué depuis le début des années 2000 et sont devenus au cours des projets de lois de plus en plus ambitieux. Pour réaliser cette transition énergétique, le gouvernement a mis en place plusieurs outils de gouvernance, censés assurer le bon déroulement et le suivi du processus de transformation.

#### 3.3.1 *Évolution des objectifs de la transition énergétique*

La définition des objectifs français a été en partie influencée par ceux de l'Union européenne (UE). Ainsi, l'adoption du paquet Énergie Climat en 2008 a eu un rôle structurant pour la politique énergétique française. Les objectifs européens à l'horizon 2020 sont :

- la réduction des émissions de GES de 20 % en 2020 par rapport à 1990 (ou -14 % par rapport à 2005) ;
- l'atteinte de 20 % d'EnR dans la consommation d'énergie finale ;

---

5. Dans ce paradigme, les problèmes environnementaux et par extension, la lutte contre le changement climatique peuvent être résolus grâce aux innovations technologiques et sans remise en cause du capitalisme de marché, moteur de la modernisation écologique.

6. Pour l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), « la croissance verte consiste à favoriser la croissance économique et le développement tout en veillant à ce que les actifs naturels continuent de fournir les ressources et les services environnementaux sur lesquels repose notre bien-être. Pour ce faire, elle doit catalyser l'investissement et l'innovation qui étayeront une croissance durable et créeront de nouvelles opportunités économiques » (OCDE, 2011).

- la réduction de la consommation d'énergie de 20 % par rapport à une augmentation tendancielle<sup>7</sup>.

Un Système d'échange de quotas d'émission (SEQE), plus connu sous sa désignation anglaise d'*Emissions Trading System* (ETS) est également mis en place. Une réforme de l'ETS a été menée en 2015 et 2016 afin d'améliorer son fonctionnement. Les objectifs européens ont été actualisés en octobre 2014 et revus à la hausse en 2018 avec le Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030 :

- la réduction des émissions de GES de 40 % en 2030 par rapport à 1990 ;
- l'atteinte de 32 % d'EnR dans la consommation d'énergie finale ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique de 32,5 %.

Ces objectifs européens se sont traduits pour la France à l'horizon 2030 par :

- la réduction des émissions de GES de 14 % par rapport à 2005 dans le secteur hors ETS (c'est-à-dire non couvert par le marché carbone) ;
- l'atteinte de 23 % d'EnR dans la consommation d'énergie finale ;
- la réduction de 20 % de la consommation d'énergie par rapport à une consommation tendancielle.

La transposition de ces engagements français a d'abord été réalisée dans le cadre des lois Grenelle 1 et 2 en 2009 et 2010 avec notamment des objectifs sectoriels comme une baisse de 20 % des émissions de GES dans le secteur du transport et une diminution de 38 % de la consommation d'énergie finale dans les bâtiments à l'horizon 2020. Les objectifs chiffrés ont toutefois été fixés avant l'adoption du paquet énergie-climat européen. Ces objectifs ont ensuite été modifiés dans la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015, suite à de longues discussions.

Le Débat national sur la transition énergétique (DNTE) qui démarre fin 2012 et dure plus d'un an aboutit à la création de quatre trajectoires du système énergétique pour la France aux visions contrastées : efficacité, sobriété, diversité et décarbonation (GRANDJEAN et al., 2014). Ces exercices prospectifs sont élaborés par divers acteurs : ONG, entreprises publiques, associations de recherche et administrations de l'État. Les éléments discriminants de ces quatre trajectoires futures sont au nombre de deux (voir Figure 3.1) : la réduction de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2050 et le poids relatif de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables dans la production d'électricité.

À l'issue du DNTE, une nouvelle loi est adoptée en août 2015 dont les principales orientations s'inspirent des trajectoires efficacité et diversité. Cette Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a pour principaux objectifs (FRANCE, 2015) :

7. On notera que ce dernier objectif est plus difficile à évaluer que les autres puisqu'il doit se faire par rapport à un scénario de référence.

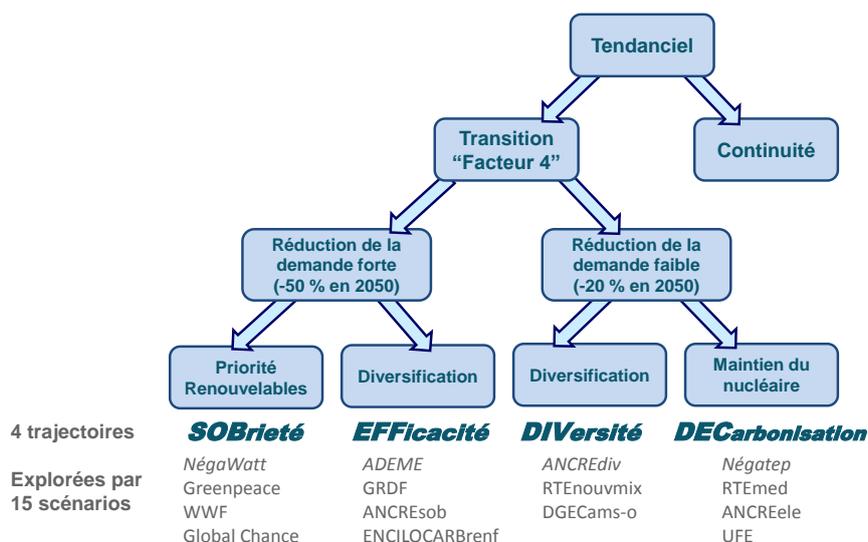


FIGURE 3.1 – Trajectoires issues du DNTE

Source : Patrick Criqui dans ARDITI et al. (2013)

- la réduction de 40 % des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990 et de 75 % en 2050 ;
- la réduction de 50 % de la consommation énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 ;
- la réduction de 30 % de la consommation d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012 ;
- la réduction de 50 % des déchets mis en décharge à l'horizon 2025 ;
- l'augmentation de la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale d'énergie en 2030 et à 40 % de la production d'électricité ;
- la baisse à 50 % de la part du nucléaire dans la production d'électricité à l'horizon 2025.

Plus récemment, les négociations se déroulant au niveau mondial ont abouti à l'adoption de l'accord de Paris lors de la COP 21 en 2015 qui fixe comme nouvel objectif de « conten[ir] l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et [de] poursuiv[re] l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels » (article 2). Pour s'aligner sur ce nouvel objectif, la France a publié en 2017 un Plan Climat (MTES, 2017) qui inscrit comme nouvel horizon la neutralité carbone en 2050 et fixe de nouvelles orientations pour la politique énergétique. Contrairement aux autres documents précités, il n'est pas le résultat d'un processus législatif et n'a donc pas de vocation prescriptive. Par ailleurs, ce document ne précise pas comment la neutralité carbone doit être atteinte et notamment si le recours à des compensations carbone

internationales est autorisé. En pratique<sup>8</sup>, l'administration cherche à satisfaire cet objectif avec comme périmètre les émissions nationales et en ayant recours au stockage de carbone dans le sol et/ou aux puits de carbone liés au secteur Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF)<sup>9</sup>.

En matière d'objectifs de la politique énergétique (voir récapitulatif [Tableau 3.1](#)), on observe que depuis les années 2000, la politique énergétique suit un cycle de 5 années environ. Deux ou trois ans après l'adoption d'une loi, une nouvelle concertation d'un ou deux ans est lancée et aboutit à l'adoption de nouveaux objectifs et d'une nouvelle loi. Ce cycle sera sûrement suivi cette année (2019) puisque de nouvelles discussions sont en cours pour adopter une nouvelle loi qui actera le changement d'objectif de réduction des émissions, c'est-à-dire la neutralité carbone au lieu du « Facteur 4 ». Comme le fait remarquer VIRLOUVET (2015), « l'ensemble des documents nationaux de planification climatique commencent par affirmer que les résultats du plan précédent n'ont pas été atteints ». Beaucoup de documents reprennent par ailleurs d'anciennes mesures des plans précédents. Par exemple, les instruments économiques annoncés dans le PNLCC 2000 n'ont pas été mis en place et ont été repris dans les Plans Climats de 2004 et 2009. Concernant le processus d'élaboration de la loi, le Grenelle a été un tournant dans la prise en compte de l'enjeu climat dans la politique énergétique (VIRLOUVET, 2015) et a instauré un processus de consultation des différentes parties prenantes. Celui-ci a été renforcé par le DNTE.

Le suivi des objectifs de la loi LTECV est éparpillé entre plusieurs documents produits par le ministère ce qui nuit à la lisibilité de l'avancement de la transition. Ainsi, les engagements des lois précédentes ne sont pas spécifiquement suivis. Le [Tableau 3.1](#) résume l'évolution et l'avancée des principaux objectifs qui ont été adoptés depuis les années 2000 par la France. Concernant les émissions, l'objectif de 2020 sera peut-être tenu sous réserve que la remontée des émissions de GES observée ces dernières années ne se poursuive pas. Par contre, la baisse de la consommation d'énergie finale ne correspond pas aux engagements. Notamment, l'objectif de la loi POPE en matière d'intensité énergétique finale n'a pas été tenu. On notera que juste après l'adoption de la LTECV, un site<sup>10</sup> a été créé par le ministère pour suivre l'avancement de l'adoption des différents décrets découlant de la loi. Mais ce système a rapidement été abandonné suite aux divers changements de l'administration et de ministre.

---

8. Communication personnelle avec la DGEC. C'est également ce qui a été fait dans le cadre de la Commission Quinet, voir QUINET et al. (2019).

9. En anglais, *Land Use, Land-Use Change, and Forestry* (LULUCF)

10. <http://web.archive.org/web/20160421000514/http://www.developpement-durable.gouv.fr/Module-de-suivi-de-la-loi-de.html>

TABLE 3.1 – Les grands objectifs de la politique énergétique en France

OBJECTIFS	RÉALISÉ	LTECV	LOIS GRENELLE	LOI POPE	CADRE EUROPÉEN
ÉMISSIONS DE GES	GES - 1990 : 542 MtCO <sub>2</sub> e - 2018 : -20 % soit 432 MtCO <sub>2</sub> e GES non SEQE : non suivi	2030 : -40 % GES (réf. 1990) 2050 : -75 % GES (réf. 1990)	2020 : prendre part à l'objectif de -20 % des GES de l'UE 2050 : Facteur 4 pour les GES	2050 : contribuer à la fixation d'un objectif mondial d'une division par 2 des GES et donc une division par 4 ou 5 pour les pays développés	2020 : -14 % GES non SEQE (réf. 2005) 2030 : -37 % GES non SEQE (réf. 2005)
	Réduction moyenne par année - depuis 1990 : -0,6 % - depuis 2005 : -1,4 % - depuis 2010 : -1,3 %		-3 % par an en moyenne	-3 % par an en moyenne	
ÉNERGIE FINALE	Conso. d'énergie finale - 2012 : 144 Mtep (CVC et réel) - 2018 : 141 Mtep (CVC), 144 (réel)	2030 : -20 % de la conso. d'énergie finale (réf. 2012) 2050 : -50 % de la conso. d'énergie finale (réf. 2012)	2020 : prendre part à l'objectif d'amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique de l'UE		2020 : -20 % de la conso. d'énergie (réf. une conso. tendancielle) soit 131,4 Mtep** 2030 : -32,5 % de la conso. d'énergie finale***
	Réduction par année - depuis 2005 : -0,5 % (CVC et réel) - depuis 2015 : 0 % (CVC), +1 % (réel)			Dès 2015 : -2 % par an en moyenne de l'intensité énergétique finale D'ici 2030 : -2,5 % par an en moyenne	
ENR	EnR dans la conso. finale brute d'énergie - 2010 : 13 % - 2018 : 16,5 % → production d'EnR : 26 Mtep	2020 : 23 % d'EnR dans la conso. finale brute d'énergie 2030 : 32 % d'EnR dans la conso. finale brute d'énergie	2020 : 23 % d'EnR dans la conso. d'énergie finale → production d'EnR : 37 Mtep	2010 : 10 % des besoins énergétiques couverts par les EnR	2020 : 23 % d'EnR dans la conso. d'énergie finale 2030 : 32 % d'EnR dans la conso. d'énergie finale*
	EnR dans l'électricité - 2010 : 15 % - 2017 : 18 %	2030 : 40 % d'EnR dans la production d'électricité		2010 : 21 % d'EnR dans la consommation intérieure d'électricité	
NUCLÉAIRE	Chaleur 2011 : augmentation de 13 % de la chaleur renouvelable			2010 : +50 % de chaleur renouvelable	
	2017 : 72 % de nucléaire dans la production d'électricité	2025 : 50 % de nucléaire dans la production d'électricité (re-poré à l'horizon 2035)			
ÉNERGIES FOSSILES	2018 : -6 % par rapport à 2012	2030 : -30 % de la conso. d'énergies fossiles (réf. 2012)			

CVC : corrigés des variations climatiques

\* objectif européen non transcrit pour la France

\*\* l'objectif d'efficacité énergétique européen peut être exprimé en énergie primaire ou finale suivant les pays

### 3.3.2 *Processus de fabrication des scénarios de la DGEC*

Pour gouverner une transition énergétique, il est indispensable de savoir comment le système énergétique peut évoluer. Dans cette optique, des exercices de prospective sont réalisés afin d'étudier des évolutions possibles du système énergétique. Par ailleurs, dans le cadre de ses engagements européens et internationaux, la France doit fournir des projections de sa consommation d'énergie et de ses émissions de GES. Pour l'UE, ces rapports doivent être rendus sur une base bisannuelle dans le cadre du règlement MMR (mécanisme de surveillance européen). À l'international, ces scénarios doivent être rapportés auprès de la CCNUCC sur la base d'un rapport bisannuel et d'une communication tous les quatre ans. Ces scénarios servent par ailleurs de support à l'élaboration de la SNBC (voir sous-section 3.3.3) qui donne les orientations stratégiques pour mettre en œuvre la LTECV dans tous les secteurs d'activité, et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui établit la trajectoire du mix énergétique et les objectifs sectoriels par vecteur énergétique pour les dix prochaines années.

Le ministère réalise donc régulièrement des scénarios d'évolution du système énergétique. Bien qu'ils soient officiellement dénommés scénarios prospectifs, ils s'apparentent plus à des scénarios de prévision. Le nom du bureau qui est chargé de ces exercices s'appelle d'ailleurs Bureau des émissions, projections et modélisations (BEPM). Les scénarios prospectifs énergie-climat-air traitent de façon intégrée ces trois volets depuis l'exercice 2010-2011. Par ailleurs, jusqu'aux scénarios prospectifs 2014-2015, l'horizon de ces projections s'arrêtait en 2035 ce qui est un objectif de moyen terme pour un système énergétique et qui s'apparente encore une fois plus à un exercice de prévision que de prospective. Pour les derniers scénarios 2018, l'horizon a toutefois été étendu à 2050 afin de prendre justement en compte l'impact d'un objectif de long terme sur la trajectoire.

La construction des scénarios s'articule autour d'un scénario de référence Avec Mesures Existantes (AME) et une variante plus volontariste Avec Mesures Supplémentaires (AMS). L'idée de ces scénarios est de montrer la trajectoire sur laquelle la France est engagée et de montrer quelles mesures supplémentaires sont nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. L'AME correspond à un scénario qui comprend l'ensemble des mesures de politique publique mises en place jusqu'à une certaine date. Il a donc vocation à être amélioré au fil des exercices : l'AME 2016 sera plus ambitieux que celui de 2014, et l'AME 2018 plus ambitieux que celui de 2016. Les scénarios AMS comprennent des mesures additionnelles qui permettent d'atteindre les objectifs fixés par le gouvernement et sont donc plus volontaristes que les scénarios AME. On notera cependant que dans les scénarios 2014-2015, le scénario AMS (qui avait donc pour horizon 2035) était plutôt défini

par la prise en compte « de politiques et mesures planifiées à [une fin d'atténuation du changement climatique] » (BEPM, 2015b). En pratique, les scénarios AMS intègrent des mesures qui ne sont pas planifiées mais qui pourraient être envisagées et mises en place par le gouvernement. Ce choix des mesures repose sur l'administration en charge de la réalisation de ces scénarios et fait l'objet de discussions au sein de l'administration entre les départements mais également avec plusieurs parties prenantes.

En effet, pour élaborer les hypothèses de construction des scénarios, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) réunit divers intervenants : associations d'industriels, représentants d'ONG, syndicats, membres de l'administration afin de discuter des hypothèses de modélisation et de les associer à l'élaboration des scénarios. Le processus de construction des scénarios dure donc plusieurs mois entre la validation par les comités de suivi<sup>11</sup> et les allers-retours avec les modélisateurs. Il est à noter que le ministère ne dispose d'aucune compétence en interne pour réaliser entièrement ces scénarios et doit donc faire appel à des prestataires extérieurs. Le ministère utilise plusieurs modèles qui doivent être raccordés les uns aux autres afin d'obtenir les résultats finaux. L'ensemble des modèles utilisés lors de l'exercice 2014-2015 et leurs liens sont présentés dans la Figure 3.2. La scénarisation et l'articulation entre les différents modèles sont donc complexes et la cohérence entre les modèles n'est pas forcément assurée. Pour les scénarios 2018, les modélisations sectorielles ont reposé sur des modèles technico-économiques de l'ADEME et du Commissariat général au développement durable (CGDD) dont les résultats ont ensuite été agrégés par Enerdata, un bureau d'études économiques. Les scénarios ont également fait l'objet d'études macro-économiques par l'ADEME, le CGDD et le CIRED (un laboratoire de recherche en économie).

L'élaboration des scénarios repose sur un ensemble de mesures sectorielles et transversales très détaillées et sur l'évaluation des effets de ces mesures sur le système énergétique. L'idée de ces scénarios est donc de présenter un panel varié de mesures qui permettent d'atteindre un ou plusieurs objectifs : réduction des émissions de GES, de la consommation d'énergie finale, etc. Cette approche conduit à un empilement de mesures pour espérer atteindre les différents objectifs, quitte à faire des allers-retours entre résultats et hypothèses pour obtenir des résultats conformes aux objectifs. On peut par ailleurs noter que ces mesures ne concernent pas du tout les modes de vie qui ne font pas l'objet de réflexions approfondies (GALLIC et al., 2014). La seule mention relative à un tel changement dans les derniers scénarios 2018 (DGEC, 2019) fait référence à « des besoins de la population en légère diminution dans l'ensemble des secteurs (en comparaison à un

---

11. Pour l'élaboration des scénarios 2018, plusieurs types de réunions se sont déroulés : pour la SNBC, comité d'information et d'orientation, groupes techniques ; et pour la PPE, comité de suivi et ateliers.

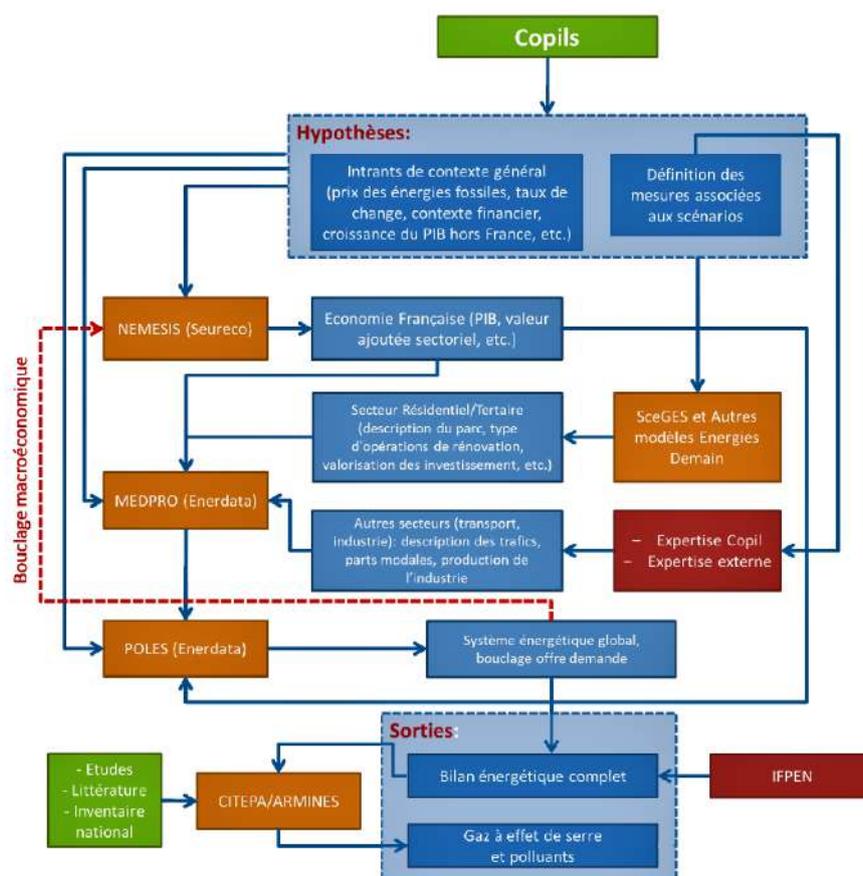


FIGURE 3.2 – Articulation des différents modèles utilisés pour les scénarios prospectifs 2014-2015 de la France

Source : DGEC (2015)

scénario tendanciel), associés à un changement important des modes de consommation sans perte de confort ». Cependant, il n’y a pas véritablement d’évaluation associée à un tel changement ni de mesures identifiées. La deuxième SNBC (MTES, 2018) reconnaît toutefois que la dimension sociologique des scénarios devra à l’avenir être mieux évaluée.

Les scénarios reposent sur de nombreuses hypothèses qui sont peu sourcées ou documentées et/ou qui apparaissent optimistes<sup>12</sup>. Dans les derniers scénarios produits par le ministère (DGEC, 2019), il est précisé que le scénario menant à la neutralité carbone « ne repose pas sur des paris technologiques majeurs, tout en recourant à un certain nombre de technologies nouvelles (capture et stockage du carbone qui n’est cependant pas utilisé massivement, hydrogène, stockage d’énergie...) ». Pourtant, le recours à des émissions négatives<sup>13</sup> est sujet à de nombreuses incertitudes notamment concernant sa faisabilité, son risque et son coût et se rattache justement à un « pari technologique majeur » (ANDERSON et PETERS, 2016). Le recours à cette technologie doit en effet reposer sur un fort investissement dans la R&D et un engagement institutionnel concret qui, pour l’instant, reste théorique en France (INERIS, 2017)<sup>14</sup>. On reconnaîtra cependant que le recours à cette technologie est limité à l’effacement de 15 MtCO<sub>2</sub>.

Dans le secteur de l’industrie, les évolutions de valeur ajoutée diminuent à partir de 2030-2035. Une décorrélation entre la production physique et la valeur ajoutée est supposée être de 20 à 40 % entre 2015 et 2050 grâce à des produits plus durables et mieux adaptés aux besoins des consommateurs. La production des Industries grandes consommatrices d’énergie (IGCE) reste constante ou baisse. La consommation de pétrole dans le secteur de la chimie est réduite de 50 % grâce au recyclage du plastique. Les consommations pour des usages non énergétiques<sup>15</sup> sont assurées par l’hydrogène décarboné produit à partir d’électrolyse ou des ressources en biomasse. Ces hypothèses

---

12. La DGEC précise que « les hypothèses de modélisation retenues sont issues de travaux d’experts qui, comme toutes hypothèses, sont parfois contestables. À l’horizon 2050, le scénario doit être regardé dans la vision d’ensemble qu’il procure et dans ses grands enseignements. L’importance ne réside pas dans la précision de chacun des chiffres ». La critique d’un scénario de prospective ne repose pas sur le choix de telle ou telle hypothèse mais sur le fait qu’elles reflètent une vision du futur. Bien que les hypothèses choisies aient fait l’objet de discussions, l’absence d’indépendance entre les personnes qui choisissent les hypothèses et les politiques qui définissent les objectifs à atteindre pousse à opter pour des hypothèses compatibles avec les objectifs affichés.

13. Les émissions négatives peuvent être produites de plusieurs façons. On peut citer notamment le captage des émissions CO<sub>2</sub> provenant de la combustion d’énergies neutres en carbone comme la biomasse, la capture du CO<sub>2</sub> dans l’air ou encore le reboisement de forêts.

14. Les premières initiatives (Total à Lacq ou EDF au Havre) qui ont été menées en France n’ont pas eu d’aboutissement concret et n’ont pas été prolongées.

15. Certaines énergies sont utilisées comme matière première dans la fabrication de certains produits : plastique, bitume, engrais, autres produits chimiques, etc.

sont simplement présentées dans le document récapitulatif sans justification.

Dans le secteur du transport, la première *SNBC* envisageait des consommations de 2 L/100km pour les voitures à horizon 2030. Les nouveaux scénarios visent 4 L/100km en 2030 pour la vente de nouvelles voitures. Les dernières tendances de l'évolution de la consommation unitaire des voitures qui s'élève à 6,4 L/100km selon les dernières données de la COMMISSION DES COMPTES DES TRANSPORTS DE LA NATION (2018), ne semblent pas indiquer une baisse rapide de la consommation compatible avec cet objectif<sup>16</sup>. La cible d'une consommation de 2 L/100km a ainsi disparu de la dernière *SNBC* pour mentionner un objectif de 100 % de voitures électriques. Une autre hypothèse importante concerne la maîtrise de la hausse du trafic qui pour l'instant n'est pas effective<sup>17</sup>.

Dans le secteur du bâtiment, les rythmes de rénovation sont très ambitieux : les gains d'efficacité énergétique pour les appareils électriques sont supposés être de 15 à 60 % mais sans aucune référence associée. Enfin, le secteur de la production d'énergie, et en particulier d'électricité, n'est pas explicitement modélisé. Ainsi, pour la DGEN (2019), « la question du mix électrique à l'horizon 2050 n'a pas été traitée dans le cadre de ce scénario ». Il ne peut donc pas y avoir de réconciliation entre les différents besoins des secteurs de consommation d'énergie finale et les gisements d'énergies renouvelables disponibles.

Entre l'analyse des scénarios 2014-2015 et ceux de 2018, on observe une nette évolution dans la façon de présenter les résultats. Dans ceux de 2014, la plus grande partie était consacrée aux résultats macro-économiques (17 pages contre 7 pages pour l'analyse du système énergétique). Dans les nouveaux scénarios, on observe l'inverse. L'étude macro-économique n'est explicitée qu'en 2 pages, sur les 47 que compte le document, à la toute fin. Les résultats des scénarios concernant la modélisation énergétique sont principalement utilisés pour élaborer les recommandations de la Stratégie nationale bas-carbone (*SNBC*) tandis que les résultats macro-économiques servent à démontrer les bénéfices économiques des mesures étudiées. La façon dont les scénarios sont construits avec le détail des mesures mises en place dans chaque secteur permet selon l'administration d'identifier les politiques publiques à mettre en place pour atteindre les objectifs fixés dans la loi. En réalité, il n'y a pas vraiment d'évaluation de la meilleure mesure à mettre en place, mais plutôt une proposition de mesure, ajustée pour arriver aux objectifs. Par ailleurs, l'élabora-

---

16. À ce propos, on pourra relever un souvenir de Jacques Theys : « Déjà [vers 1985], je m'en souviens, les constructeurs automobiles faisaient miroiter la perspective de moteurs consommant trois litres au cent pour s'opposer aux pots catalytiques » (BARRÉ, LAVOIX et PIVETEAU, 2015a).

17. Selon les données 2018 des Comptes des Transports de la Nation, le transport de voyageurs et de marchandises est en hausse constante ces dernières années excepté le transport ferroviaire de marchandises.

tion des scénarios 2018 n'a pas bénéficié d'un retour d'expérience de l'évaluation de la mise en œuvre de la précédente [SNBC](#) puisque le processus a démarré à la fin de l'automne 2017 ([RÜDINGER, 2018b](#)). La pertinence des nouvelles propositions de mesures est donc difficile à évaluer sans le retour de la première expérience.

La principale critique que l'on peut adresser aux scénarios de la [SNBC](#) du ministère consiste en son absence de raccordement avec la Programmation pluriannuelle de l'énergie ([PPE](#)). En effet, le Bureau des émissions, projections et modélisations ([BEPM](#)) en charge de la réalisation des scénarios n'a pas vocation à fournir les scénarios qui alimente la [PPE](#). Dans la mouture des scénarios 2014-2015, les deux exercices étaient clairement séparés. Pour les nouveaux scénarios 2018, les espaces de discussions pour la [PPE](#) et la [SNBC](#) étaient communs mais le scénario 2018 de neutralité carbone ne modélise pas explicitement l'évolution du secteur de la production d'énergie, et en particulier celui de l'électricité. Dans le résumé de la [SNBC](#) ([DGEC, 2019](#)), la description de la composition du mix électrique est soigneusement omise puisque le sujet est réservé à la [PPE](#). Dans la présentation des résultats, il est clairement fait mention qu'« après 2035, le scénario ne fait plus de distinction entre [EnR](#) électriques et nucléaire pour la production d'électricité ». La question de l'intégration avec le reste du système énergétique n'est donc pas clairement démontrée.

L'élaboration des scénarios prospectifs au sein du ministère souffre également d'un manque de continuité (constat partagé par plusieurs fonctionnaires du ministère au cours d'entretiens individuels<sup>18</sup>). D'une part, le ministère ne détient pas les compétences requises pour développer et maintenir des modèles de prospective, et d'autre part, le personnel administratif est incité à changer régulièrement d'emploi. Jacques Theys considère que c'est « une des spécificités de la France de ne pas favoriser cette continuité indispensable, avec, notamment, un turn-over des ministres et des responsables administratifs, qui, par construction, privilégie la seule recherche de résultats visibles à court terme » ([THEYS, 2015a](#)). Par ailleurs, les scénarios présentés sont tous compatibles avec les objectifs affichés et ce, même en interne. Des variantes de scénarios aux hypothèses pessimistes et/ou optimistes seraient souhaitables pour alerter les décideurs politiques des enjeux associés aux mesures à mettre en place et aux technologies à déployer, en particulier le *Carbon Capture and Storage* ([CCS](#))<sup>19</sup> qui est pour l'instant indispensable pour atteindre la neutralité carbone mais qui ne fait pas l'objet d'un engagement concret de l'État.

---

18. Entretiens réalisés entre 2016 et 2018 avec plusieurs fonctionnaires de la [DGEC](#)

19. Capture et séquestration du carbone

### 3.3.3 Gouvernance et suivi de la transition

La question d'outils d'aide à la décision ou du recours à des regroupements d'experts pour éclairer les choix de politiques publiques est présent depuis longtemps dans les recommandations des diverses parties prenantes. Un rapport du [CGEDD](#) ([BRUNETIÈRE et al., 2013](#)) recommandait dès 2013 la création d'un « observatoire permanent du "facteur 4" où convergeraient les données d'observation des émissions, les produits de la veille technologique, et une capacité d'évaluation technico-économique qui fournisse aux décideurs publics, mais aussi privés, des données sur les rapports coûts/"avantages carbone" des possibilités techniques connues à un moment donné ».

Pour accompagner la [LTECV](#), deux documents que nous avons déjà présentés brièvement sont élaborés et constituent la feuille de route pour la politique énergétique française : la Stratégie nationale bas-carbone ([SNBC](#)) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie ([PPE](#)). Ils s'appuient sur les scénarios élaborés par la [DGEC](#) que nous avons détaillés précédemment. La [SNBC](#) est censée s'imposer auprès de toutes les administrations. En pratique, il n'y pas de moyens d'incitations ou de sanctions pour qu'elle soit prise en compte par les différents ministères. Elle a aussi pour rôle de donner une direction au secteur privé mais cela dépend de la crédibilité accordée à ce document par l'ensemble des acteurs. On notera que la [PPE](#) comprend l'ensemble des questions liées à l'énergie (approvisionnement, infrastructure mais aussi demande) ce qui permet d'avoir une vision plus complète que dans les documents précédents de stratégie énergétique.

Faisant suite à la dernière actualisation du Plan Climat de 2013, la première Stratégie nationale bas-carbone ([SNBC](#)) a été adoptée en 2015 ([MEDDE, 2015](#)). Pour arriver à l'objectif de long terme de réduction des émissions CO<sub>2</sub> de 75 % en 2050 par rapport à 1990, elle définit des budgets carbone<sup>20</sup> pour le court et le moyen terme, c'est-à-dire jusqu'en 2028. Ceux-ci ne sont pas prescriptifs mais ont vocation à servir d'indicateurs pour savoir si la France est sur la bonne trajectoire. L'instauration des budgets carbone s'inspire du dispositif existant au Royaume-Uni où ceux-ci sont fixés pour guider l'action publique (voir [sous-section 3.3.4](#)). Ils sont adoptés par le gouvernement après proposition d'un groupe d'expert, le *Committee on Climate Change* ([CCC](#)). En France, ils sont proposés par la [DGEC](#) en se basant sur les scénarios prospectifs que le [BEPM](#) réalise. Le document de la [SNBC1](#) comprend également 44 recommandations sectorielles (transports, bâtiments, industrie, etc.) et 23 recommandations transversales (empreinte carbone, recherche et innovation, formation, etc.) pour orienter les décisions et les investissements des politiques publiques. Pour le suivi de la

---

20. Un budget carbone est une quantité d'émissions de [GES](#) que l'on s'autorise à émettre au maximum et qui correspond, avec une forte probabilité, à une augmentation de la température moyenne mondiale fixée.

mise en œuvre de la [SNBC](#), des indicateurs associés à chaque recommandation sont définis ainsi que des indicateurs de synthèse (qui comprennent des indicateurs globaux sur les émissions, la compétitivité, l'emploi, la précarité énergétique, l'air et les ressources).

La première [SNBC](#) a été accompagnée en 2016 d'une Programmation pluriannuelle de l'énergie ([PPE](#)) qui fixe les orientations et priorités d'action des pouvoirs publics pour la gestion de l'ensemble des formes d'énergie afin d'atteindre les objectifs de la politique énergétique. Elle comprend des volets sur :

- la sécurité d'approvisionnement ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique et la baisse de la consommation d'énergie primaire, en particulier fossile ;
- le développement de l'exploitation des énergies renouvelables et de récupération ;
- le développement équilibré des réseaux, du stockage, de la transformation des énergies et du pilotage de la demande d'énergie ;
- la stratégie de développement de la mobilité propre ;
- la préservation du pouvoir d'achat des consommateurs et de la compétitivité des prix de l'énergie ;
- l'évaluation des besoins de compétences professionnelles.

La première mouture de ces documents stratégiques pour la politique énergétique française a cependant soigneusement évité les sujets de controverse comme le devenir du parc nucléaire.

Après de nombreux reports, la deuxième [SNBC](#) a été publiée en fin d'année 2018. Elle s'appuie sur des nouveaux scénarios du système énergétique qui ont pour objectif la neutralité carbone en 2050. Le premier budget carbone pour la période 2015-2018 de la [SNBC1](#), fixé à 440 MtCO<sub>2</sub>eq n'a pas été respecté puisqu'un dépassement de 72 MtCO<sub>2</sub>eq est prévu. Le retard pris lors de cette phase compromet la réalisation des objectifs pour les périodes suivantes. La deuxième [SNBC](#) ([MTES, 2018](#)) acte donc la non-réalisation de l'objectif et revoit à la hausse le budget carbone de la prochaine période (2019-2023) mais sans revoir à la baisse les budgets suivants. À noter qu'au contraire du Royaume-Uni, la définition des budgets carbone peut être révisée tous les 5 ans. Dans le projet de la nouvelle [PPE](#) ([MTES, 2019](#)), publié début 2019, l'objectif de diminution de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2030 est revue à la baisse (-14 % en 2028 par rapport à 2012 alors que l'objectif de la [LTECV](#) en 2030 est de la réduire de 20 %) tandis que celui de baisse de la consommation d'énergies fossiles est quant à lui renforcé (-35 % en 2028 alors que l'objectif de la [LTECV](#) est de la baisser de 30 % en 2030 par rapport à 2012). Contrairement à la précédente [PPE](#), le document prévoit une fermeture de quatorze centrales nucléaires pour respecter l'objectif de réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité. Parallèlement, il prévoit

l'augmentation de l'installation des capacités EnR (principalement éolien et solaire).

Comme expliqué en sous-section 3.3.2, l'élaboration de la SNBC et de la PPE s'est appuyée sur les scénarios développés par la DGEC. Un espace de discussion a regroupé de nombreux acteurs et parties prenantes du monde de l'énergie et de l'environnement, des grands industriels, des associations de consommateurs, des associations environnementales, des producteurs d'énergie, des distributeurs, des experts académiques, des associations environnementales. Le ministère a essayé de rassembler les points de vue exprimés et de trouver un point de convergence entre leurs visions et les objectifs fixés par la loi. Cependant, la tenue du débat a été très centrée sur la France alors que les décisions aux niveaux européen et international auront un impact sur la situation française.

Ces deux documents stratégiques sont soumis à une évaluation de la part de différents comités de suivi avant leur publication officielle. À l'heure où nous écrivons ces lignes, la dernière SNBC (MTES, 2018) est ainsi encore à l'état de projet. En effet, le report de l'objectif de diminution de la part du nucléaire à 2035 tel que mis en place par la nouvelle PPE doit être adopté dans une nouvelle loi pour que la PPE ne soit pas « hors la loi » ou « illégale ». Le projet de SNBC doit faire l'objet d'un avis de la part du CETE (Comité d'experts de la transition énergétique), du CNTE (Conseil national de la transition énergétique) et de l'Autorité environnementale. La PPE doit également faire l'objet d'un avis de ces mêmes comités, en plus de ceux du CSE (Conseil supérieur de l'environnement), du Comité de gestion de la CSPE et du Comité du système de distribution publique d'électricité.

La LTECV a donc introduit en 2015 un nouveau comité chargé d'évaluer le bon déroulement de la transition énergétique, le Comité d'experts pour la transition énergétique (CETE). Ce comité comprend huit experts et doit rendre un avis sur les budgets carbone, la SNBC, la PPE et les Plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET). Il n'a rendu des avis que pour les premières moutures des documents stratégiques (SNBC<sub>1</sub>, PPE<sub>1</sub> ainsi que les PPE insulaires) avant d'être dissous et remplacé par le Haut conseil pour le climat (HCC). Le CETE a eu principalement pour but de questionner la méthodologie adoptée, la cohérence des hypothèses ou des choix méthodologiques effectués par le ministère dans l'élaboration des scénarios. En effet, au lieu d'émettre des avis sur le projet en lui-même, le CETE s'est principalement attaché à donner des recommandations sur la méthode adoptée afin d'améliorer les prochains documents. Alors qu'à l'origine, la SNBC et la PPE étaient censées prendre en compte l'avis du CETE, leur transmission au comité est bien trop tardive, peu de temps avant la publication officielle des documents, pour que cela soit possible (RÜDINGER et VALLEJO, 2018). Il ne peut donc servir que pour les prochains exercices.

Les membres du comité ont ainsi dû faire face à plusieurs difficultés pour remplir leur mission à cause notamment du manque de ressources accordées pour mener les analyses et du peu de temps alloué à la production des avis. Les documents à analyser étaient très nombreux, exigeant un travail d'analyse différent pour chacun, et étaient de qualité variables. Pour RÜDINGER (2018b), l'emploi de scénarios prospectifs limités aux versions Avec Mesures Existantes (AME) et Avec Mesures Supplémentaires (AMS) ne permet pas au CETE d'évaluer l'effet des politiques publiques à court terme. Par ailleurs, le processus de révision des scénarios est engagé alors même qu'il n'y a pas d'évaluation disponible de la mise en œuvre de la précédente SNBC et PPE. Les difficultés rencontrées par le CETE s'expliquent aussi en partie par le manque de clarté du mandat donné : la finalité des documents produits n'est pas précise.

En effet, malgré les nombreuses interactions entre le CETE et l'administration, celle-ci ne prend leur avis en compte que de manière limitée et un travail approfondi autour de ses recommandations n'est pas mené. Le CETE n'est d'ailleurs pas la seule instance à émettre des avis sur les documents produits par l'administration (SNBC et PPE). Ainsi, le positionnement du CETE n'est pas clairement défini par rapport aux autres instances consultatives (parmi lesquelles le CNTE, l'Autorité environnementale, le Conseil supérieur de l'environnement (CSE), etc.). L'expérience du CETE n'aura duré que 3 ans puisqu'il a été transformé fin 2018 en Haut conseil pour le climat (HCC). Ce nouveau comité a été institué en s'inspirant de son homologue britannique (le *Committee on Climate Change*). Le mode de fonctionnement du HCC a été profondément modifié par rapport au CETE puisqu'il est composé de douze experts et dispose désormais d'un secrétariat et d'un budget d'environ 2 M€ (budget en cours de discussion). Il doit rendre chaque année un rapport sur la trajectoire de baisse des émissions de GES et sur la mise en œuvre des politiques publiques permettant d'atteindre les objectifs fixés. Sa mise en place récente ne permet pas encore d'évaluer les effets concrets de ce nouveau comité.

L'administration (la DGEC) assure le suivi de la transition écologique via la mise à jour d'un ensemble d'indicateurs qui ont été définis dans la SNBC. La première évaluation a eu lieu en 2018 et a été présentée au CETE. Leur actualisation est prévue avant chaque publication de nouvelle SNBC. Ces indicateurs couvrent les principaux objectifs de la loi, les différents secteurs du système énergétique ainsi que les recommandations transversales de la SNBC<sup>21</sup> ce qui aboutit à un total de 118 indicateurs chiffrés (dont 103 renseignés) pour la SNBC et de 42 indicateurs de résultat pour la PPE (RÜDINGER, 2018c). En effet, entre

---

21. On distingue les indicateurs de résultats (19) et de contexte (14), et les indicateurs de suivi des recommandations qui sont composés des indicateurs du niveau d'intégration de chaque recommandation de la SNBC (67) dans les politiques publiques, et des indicateurs pilotes, relatifs à la mise en œuvre des recommandations transversales et sectorielles de la SNBC (84).

la publication des deux [SNBC](#), certains indicateurs ont été abandonnés car les données n'étaient pas disponibles ou étaient trop difficiles à mettre à jour. Par ailleurs, cette profusion d'indicateurs rend difficile l'appropriation des résultats globaux car il n'y a pas de hiérarchisation ni de priorité claire entre ceux-ci. Beaucoup d'indicateurs ont un historique qui ne remonte qu'à quelques années ce qui n'apporte pas de vision d'ensemble ou de long terme des enjeux associés. Le [CETE](#) avait ainsi recommandé dans son avis ([CETE, 2016](#)) de regrouper certaines recommandations transversales de la [SNBC](#) pour limiter le nombre élevé d'indicateurs.

La définition de ces indicateurs s'inscrit dans le prolongement de ceux utilisés pour la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020 ([MEDDE, 2014](#)). Ce document qui n'a pas exactement la même finalité que la [SNBC](#) apparaît en grande partie redondant ainsi que les indicateurs utilisés (sur les 79 indicateurs utilisés dans [MEDDE \(2014\)](#), 50 % sont eux-mêmes liés à l'énergie et au climat). Une fois encore, la multiplicité des documents et des indicateurs brouille leur lisibilité et l'évaluation du processus de transition. [L'Id드리](#) a ainsi récemment proposé de simplifier l'organisation des indicateurs utilisés ([RÜDINGER, 2018c](#)) pour améliorer la gouvernance de la transition avec une hiérarchisation des indicateurs globaux et sectoriels, insistant également sur l'importance de leur transparence.

La [SNBC](#) et la [PPE](#) ne sont pas les seuls documents stratégiques pour la mise en œuvre de la transition énergétique bas-carbone française. La Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020 ([MEDDE, 2014](#)) qui a succédé à la Stratégie nationale de développement durable 2010-2013<sup>22</sup> propose un nouveau modèle de société plus sobre à horizon 2020. Même s'il a été mis à jour deux fois depuis sa publication, l'attention portée à ce document reste limitée et n'a donné lieu qu'à une publication d'un rapport au Parlement en 2016. Ce document apparaît par ailleurs en grande partie redondant avec la [SNBC](#), tout comme les indicateurs utilisés même s'ils sont censés être plus généraux. De manière officieuse, ce document n'est d'ailleurs pas considéré comme important par les membres de l'administration.

D'autres documents produits en lien avec la [PPE](#) et la [SNBC](#) ont également été instaurés par la [LTECV](#) comme la Stratégie nationale de mobilité et la Stratégie de mobilisation de la biomasse. À l'échelon régional ou territorial, d'autres outils de planification doivent être produits pour décliner la stratégie au niveau local. Depuis la décentralisation engagée dans les années 1980, les régions ont de plus en

---

22. Jacques Theys fait remarquer à propos de cette stratégie qu'elle contenait plus de 250 objectifs différents, soit « le contraire d'une stratégie » ([BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015b](#)).

plus de responsabilités. Initiés lors du Grenelle de l'environnement<sup>23</sup>, les **SRADDET** (Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires) et **PCAET** (Plan climat-air-énergie territorial) permettent d'aménager le territoire en tenant compte des objectifs fixés au niveau national concernant l'énergie, la pollution de l'air, la mobilité et l'urbanisme. L'articulation de l'ensemble de ces documents est présentée dans la **Figure 3.3**. Cependant, la réconciliation entre les objectifs fixés à l'échelle nationale et locale n'est pas garantie. Le problème d'articulation entre les échelles européenne, nationale et locale avait d'ailleurs déjà été souligné dans l'avis du **CETE** sur la première **PPE** (CETE, 2016). En outre, d'autres documents plus sectoriels sont élaborés concernant l'aménagement, l'urbanisme ou le transport (Plan local d'urbanisme, Plan de déplacements urbains, etc.) mais leur logique et temporalité diffèrent, ce qui pose, entre autres, le problème de leur intégration (POUPEAU, 2016), en particulier avec les stratégies nationales.

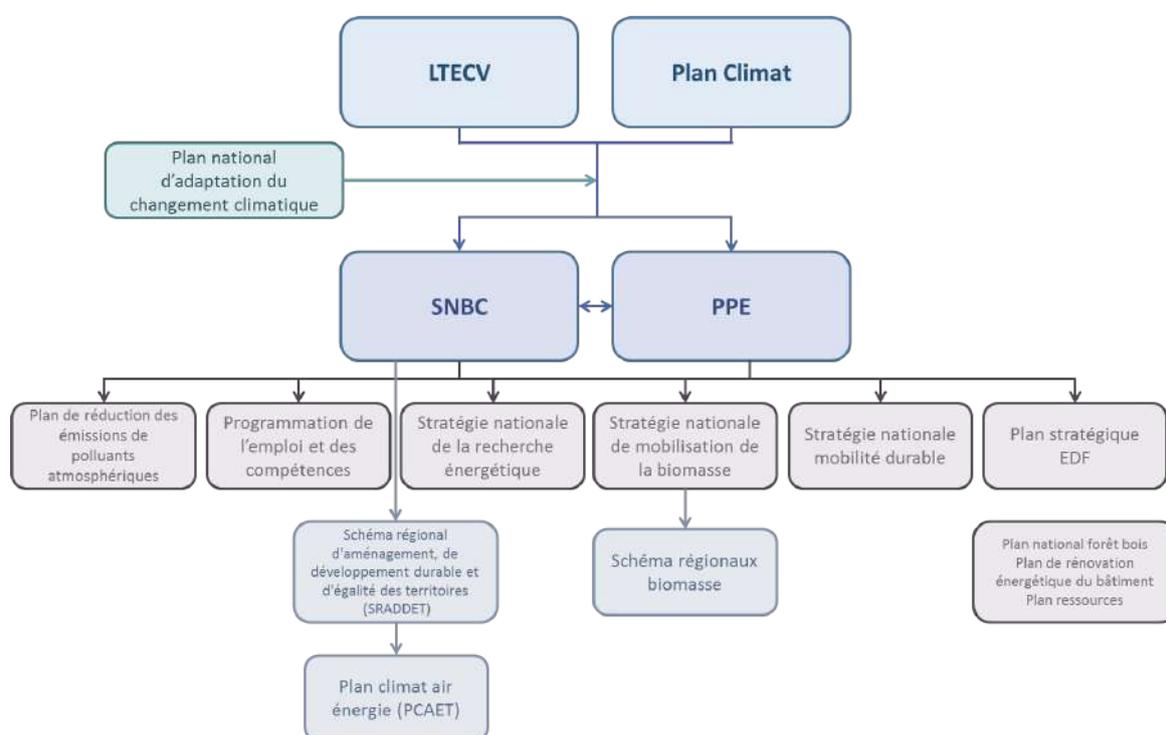


FIGURE 3.3 – Articulation des outils de planification

On observe donc une multiplication des documents stratégiques de planification et de gouvernance de la transition énergétique ainsi qu'une multiplication des comités censés évaluer et suivre le processus de transition énergétique et donc des documents produits : avis, rapport d'évaluation, rapport de suivi, etc. Pour RÜDINGER (2018b), la multiplication et le morcellement des rapports d'évaluation conduit à

23. Le Grenelle initie les Schémas régionaux climat air énergie (SRCAE) qui seront fusionnés avec d'autres documents de planification au sein des SRADDET.

un manque de cohérence et d'efficacité de la politique globale (voir [Tableau 3.3](#) pour une liste des documents produits dans le cadre de la gouvernance de la transition énergétique). Ainsi, l'élaboration des autres grandes lois françaises (finance, mobilité, commerce extérieur, agriculture) prend rarement en compte ou seulement en partie la [SNBC](#). La politique climatique s'en trouve donc pénalisée et perd en crédibilité. La profusion de documents programmatiques en est peut-être en partie la cause.

Pour réduire les émissions de [GES](#), les outils d'aide à la décision sont indispensables, en particulier dans un contexte marqué par les incertitudes. Cette complexité du suivi de la transition bas-carbone a poussé de nombreux experts à recommander une réorganisation des différentes instances consultatives comme détaillés dans les rapports de la [COUR DES COMPTES \(2018\)](#) ou de [RÜDINGER \(2018b\)](#). Ce dernier propose également une clarification de l'utilisation des indicateurs dans [RÜDINGER \(2018c\)](#). Ce constat de la complexité des outils de suivi et de redondance entre les comités de suivi, en particulier entre le [CNTE](#) et le [CETE](#) (mais aussi avec le Conseil économique, social et environnemental ([CESE](#)) et le Conseil supérieur de l'environnement ([CSE](#))) a été entendu en 2018 puisque le [CETE](#) a été dissous pour former le [HCC](#), ce qui permettra peut-être de renouveler l'approche de la gouvernance et du suivi de la transition énergétique.

#### 3.3.4 *Les autres gouvernances de la transition énergétique*

La mise en place du suivi et de la gouvernance de la transition en France s'est inspirée de l'expérience anglaise. Les deux premiers pays européens à avoir instauré une procédure de suivi et d'évaluation du processus de transition énergétique sont l'Angleterre et l'Allemagne.

##### *Le Royaume-Uni*

En Angleterre, le *Climate Change Act* de 2008 modifie profondément la politique publique concernant le changement climatique. Cette loi a bénéficié d'une *fenêtre d'opportunité* ([CARTER et JACOBS, 2014](#); [LOCKWOOD, 2013](#)), un momentum politique qui a permis l'émergence d'un consensus politique pour son adoption. Cette légitimité a été également favorisée par la publication du rapport Stern ([STERN, 2006](#)) qui a montré l'intérêt économique de lutter contre le changement climatique ([LORENZONI et BENSON, 2014](#)). La loi introduit d'une part un objectif contraignant de réduction des émissions de [GES](#) de 80 % en 2050 par rapport à 1990 mais également un cadre de gouvernance permettant de contrôler le processus de transition énergétique. Afin d'atteindre cet objectif ambitieux, elle introduit l'adoption de budgets carbone à court et moyen terme. Ces budgets carbone sont définis par période de 5 ans pour accorder de la flexibilité face à des événements exogènes et ce, 12 ans à l'avance pour donner une vision à long terme

TABLE 3.3 – Inventaire (non exhaustif) des principaux rapports d'évaluation de la transition bas-carbone prévus par la LTECV de 2015

RAPPORT	FRÉQUENCE	AUTEUR	COMMENTAIRES
Rapport sur la lutte contre le changement climatique	Annuelle	Gouvernement	Document de politique transversale annexé au projet de loi de finances
Rapport sur le financement de la transition énergétique	Annuelle	Gouvernement	Jaune budgétaire annexé au projet de loi de finances
Rapport annuel de suivi de la PPE (suivi des indicateurs de résultats)	Annuelle	Gouvernement	CNTE
Rapport d'avancement sur la PPE	Bisannuel	Gouvernement	Présenté au CNTE, CSE, CETE
Rapport d'avancement sur la SNBC	Bisannuel	Gouvernement	Présenté au CNTE, CSE, CETE
Avis sur la mise en œuvre de la PPE en cours	5 ans	CETE	
Avis sur l'atteinte des budgets carbone et de la SNBC en cours	5 ans	CETE	Rapport transmis au Parlement
Avis sur le projet de PPE révisé, avant adoption définitive	5 ans	CNTE, CETE, CSE, Comité de gestion de la CSPE, Comité du système de distribution publique d'électricité, Autorité environnementale	
Avis sur le projet de SNBC révisé avant adoption définitive	5 ans	CNTE, CETE, Autorité environnementale	
Synthèse des SRCAE	5 ans	CETE	
Rapport détaillant la stratégie nationale de rénovation énergétique (article 4 loi TECV)	5 ans	Gouvernement	Rapport au Parlement

Source : RÜDINGER (2018b)

aux parties prenantes (FANKHAUSER, AVERCHENKOVA et FINNEGAN, 2018).

La loi institue également le *Committee on Climate Change* (CCC), une autorité administrative indépendante du gouvernement qui a pour mission de suivre et d'évaluer les progrès réalisés ainsi que de proposer des politiques publiques supplémentaires ou des modifications. Ce comité a une relation directe avec le Parlement britannique puisque le gouvernement doit répondre devant celui-ci aux rapports du CCC. Le rôle du Parlement est particulièrement important car il doit valider les budgets carbone proposés par le gouvernement. Le CCC a pour principales missions de conseiller le gouvernement et d'évaluer les politiques mises en place à la fois sur les volets atténuation et adaptation. Concernant l'adaptation, le CCC évalue le programme national d'adaptation au changement climatique ainsi que le *Climate Risk Assessment* qui doit être publié tous les 5 ans en principe.

Le CCC conseille le gouvernement dans la définition des budgets carbone. Celui-ci peut refuser ses recommandations en justifiant sa position devant le Parlement. Une fois que les budgets carbone sont adoptés, le gouvernement est tenu par la loi de les respecter bien qu'aucune sanction ne soit prévue. L'embarras politique potentiel associé au manquement des objectifs ainsi que la menace d'un contrôle judiciaire suffit toutefois, selon FANKHAUSER, AVERCHENKOVA et FINNEGAN (2018), à inciter le gouvernement à les respecter. Le CCC propose une décomposition sectorielle de ces budgets dans son avis mais elle n'est qu'indicative. Celle-ci s'appuie sur des scénarios produits par le CCC qui servent avant tout à démontrer la faisabilité de la trajectoire. Pour chaque budget carbone adopté, le gouvernement doit annoncer comment il compte remplir ses objectifs avec un plan de réduction des émissions. Le CCC évalue ce plan et émet des recommandations. Il précise à l'avance sur quels critères sera jugé le plan proposé par le gouvernement. De plus, à la fin de chaque période associée à un budget, le CCC évalue la performance des politiques publiques mises en place.

Chaque année, un rapport de progrès est produit à destination du Parlement pour indiquer si le pays est sur la bonne trajectoire. Il évalue l'impact des mesures (politiques publiques mises en place) pour déterminer si l'évolution des émissions de GES est en accord avec l'objectif fixé et, dans le cas contraire, quel est l'écart entre la trajectoire requise et la trajectoire actuelle. Ce rapport est accompagné d'un ensemble de recommandations, d'indicateurs et d'une évaluation des progrès qui se fait là aussi comparativement à une trajectoire de moindre coût dans chaque secteur. Celles-ci sont élaborées grâce à la mise à disposition de base de données et d'outils de modélisation employés par les ministères (RÜDINGER et VALLEJO, 2018). Les indicateurs se répartissent entre 16 indicateurs principaux et une centaine d'autres décomposés en *Headline, Implementation* et *Policy milestones*, couvrant

l'ensemble des secteurs d'émissions. Le gouvernement doit répondre à ce rapport devant le Parlement et expliquer ses points de désaccord. Le CCC évalue donc aussi si la trajectoire actuelle des émissions est compatible avec celle des budgets carbone.

Les analyses du CCC doivent prendre en compte les problématiques de compétitivité et de durabilité dans ses analyses dans les domaines du changement climatique, de l'économie et des politiques publiques. Dans son mandat, il est tenu de prendre en compte les impacts sur le coût de l'énergie, sur la compétitivité des industries et de l'économie, l'impact sur le déficit et la dette au Royaume-Uni et d'émettre des recommandations pour compenser ces impacts. Le CCC peut aussi s'auto-saisir pour explorer une question ou une thématique particulière, comme celles de la compétitivité économique ou de l'importance du CCS.

Le CCC est composé de deux comités, l'un en charge de l'atténuation qui regroupe neuf membres et l'autre en charge de l'adaptation qui compte six membres. Les experts couvrent différents champs d'expertise tels que la science du changement climatique, l'économie et l'industrie. Ils sont nommés par le gouvernement pour des mandats de 5 ans, renouvelables une fois. La nomination du président de l'organisation doit être validée par une audition devant le Parlement. L'influence et la crédibilité du comité ont été favorisées par le statut politique de son président, un Lord, considéré comme peu soumis aux pressions car nommé à vie (RÜDINGER et VALLEJO, 2018).

Le comité dispose de moyens financiers conséquents pour produire ses analyses et ses recommandations de façon indépendante. Il s'appuie sur un secrétariat composé de 25 à 30 personnes qui permet de couvrir l'ensemble des thématiques liées aux problèmes du changement climatique : économie, science, technologie, politique publique et communication. Un budget d'environ 4 M€ lui est alloué en provenance de ses ministères de tutelle, le ministère de l'Énergie et du climat et le ministère de l'Environnement. Le budget a fluctué au cours du temps car il n'y a pas de minimum précisé mais doit être suffisant pour assurer les missions du CCC.

La réputation du CCC est excellente, d'une part grâce à son statut indépendant et d'autre part grâce à l'expertise reconnue de ses membres. La qualité de ses recommandations et de ses évaluations est estimée par les différentes parties prenantes qui ont facilement accès à leurs publications et s'en saisissent. L'administration reconnaît également son utilité (RÜDINGER et VALLEJO, 2018). La durée du mandat des membres du comité a par ailleurs favorisé sa continuité et sa stabilité depuis son instauration en 2008. Jusqu'à présent, le gouvernement a toujours suivi les recommandations du CCC, en particulier sur la définition des budgets carbone. Cependant, le contexte politique favorable de 2008 a beaucoup évolué et d'autres thématiques comme la crise économique, le Brexit ou l'immigration ont réduit la priorité

accordée à l'action climatique. Les efforts fournis jusqu'à présent ont été les moins coûteux et les plus faciles à réaliser comme la sortie du charbon dans le secteur de l'électricité. Les principaux défis sont maintenant dans le transport et l'efficacité énergétique. La dernière stratégie adoptée par le gouvernement britannique, la *Clean Growth Strategy*, a ainsi été critiquée pour son manque d'ambition. Le CCC a en effet estimé qu'il y avait encore des écarts entre la trajectoire envisagée et les engagements des 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> budgets carbone (CCC, 2018). Toutefois, la dernière recommandation du CCC d'instituer un objectif de neutralité carbone pour se mettre en conformité avec les objectifs de l'accord de Paris (CCC, 2019) a été suivi d'effets puisqu'en 2019, le Royaume-Uni a adopté un objectif contraignant de neutralité carbone (EVANS, 2019).

### *L'Allemagne*

En Allemagne, la gouvernance et le suivi de l'*Energiewende* est institué par l'*Energiekonzept* adopté en 2010. La stratégie s'inscrit dans une réflexion remontant à 1980 avec la publication de l'Öko-Institut sur un futur système énergétique sans pétrole et sans nucléaire (KRAUSE, BOSSEL et MÜLLER-REISSMANN, 1980). La première version du projet prévoit l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires mais suite à l'accident de Fukushima en 2011, le gouvernement décide d'accélérer la sortie du nucléaire. Les objectifs de l'*Energiekonzept* restent toutefois inchangés. Le plan d'action chiffré comprend la diminution des émissions de GES de 80 % en 2050 par rapport à 1990, le développement des énergies renouvelables et des objectifs d'efficacité énergétique. La sortie du nucléaire, prévue pour 2022, ne fait pas partie des objectifs quantitatifs de l'*Energiekonzept* mais des objectifs politiques structurant la modification du système énergétique. Les objectifs généraux de l'*Energiewende* s'inscrivent également dans le « triangle des politiques énergétiques » : sécurité d'approvisionnement, soutenabilité économique et compatibilité environnementale (WÖRLEN, RIESEBERG et LORENZ, 2014).

La gestion du processus de gouvernance de la transition est placée sous la responsabilité du ministère fédéral des Affaires économiques et énergie (BMWi) et du ministère de l'Environnement (BMUN). Chaque année, le ministère (BMWi) produit un document intitulé *Monitoring Report* qui décrit l'état de la transition énergétique (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY, 2018) et tous les trois ans est publié un *Strategic Report* (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY, 2019) qui est un approfondissement du rapport précédent, avec des évaluations sur une base pluriannuelle. Un comité, composé de quatre experts est chargé de commenter ces rapports. Chaque membre dispose d'un assistant et d'une personne qui fait le lien entre l'administration et le comité. Les missions de ce comité sont les suivantes : l'appui dans la mise en œuvre du processus de suivi et

d'évaluation de la transition et la sélection d'indicateurs, l'évaluation scientifique des rapports de suivi de la transition et l'analyse critique de la réalisation de la transition. Le comité analyse notamment les progrès réalisés dans le développement des énergies renouvelables, de la consommation d'énergie et de l'efficacité énergétique ainsi que des objectifs de la politique énergétique dans le secteur du bâtiment et décrit l'état de mise en œuvre des mesures correspondantes.

Le comité d'experts est chargé de rendre deux types d'avis. Dans son avis au *Monitoring Report*, le comité analyse les progrès réalisés, les écarts par rapport à l'objectif, estime son évolution à moyen terme et émet des recommandations pour l'évaluation de la mise en œuvre des politiques publiques (de façon qualitative). Pour son avis au *Strategic Report*, le comité reprend le même type d'évaluation que précédemment mais de manière plus approfondie. Pour rendre ces avis, il s'appuie sur la revue d'une cinquantaine d'indicateurs et leur évolution annuelle. Les indicateurs sont donc clairement hiérarchisés entre ceux qui correspondent aux objectifs principaux de *l'Energiewende*, c'est-à-dire la sortie du nucléaire et la baisse des émissions, et les indicateurs en découlant (efficacité énergétique, renouvelables, etc.). Les indicateurs les plus stratégiques sont appréciés grâce un système de feux tricolore. L'évaluation se fait en se basant sur le « triangle des politiques énergétiques » tel que défini précédemment. Les avis produits (LÖSCHEL et al., 2018) sont aussi conséquents que ceux du ministère<sup>24</sup>. Par ailleurs, le mandat de ce comité ne recouvre pas l'analyse des évolutions probables des indicateurs dans le futur, qui est toutefois réalisée à la marge.

Les avis critiques du comité ont été utiles dans l'amélioration des rapports proposés par le gouvernement. Les experts ont notamment proposé une hiérarchie dans les indicateurs. Cependant, le manque d'audience de leur rapport limite sa portée (WÖRLEN, RIESEBERG et LORENZ, 2014). Il ne suscite pas de réponse formelle du gouvernement et ses recommandations ne sont pas contraignantes. WÖRLEN, RIESEBERG et LORENZ (2014) critiquent également le manque de clarté des objectifs des rapports produits par le gouvernement car leur positionnement se situe entre un rapport critique d'évaluation et une déclaration d'auto-congratulation. Les messages clés comme le risque de non-réalisation de l'objectif de réduction des émissions de GES ne sont pas clairement énoncés ainsi que ses conséquences politiques. La profusion d'indicateurs nuit également à la lisibilité du rapport, en particulier le fait que les indicateurs n'ont pas toujours des objectifs clairs. Enfin, ces rapports ne semblent pas avoir eu jusqu'à aujourd'hui un impact important ni déclenché de modifications dans la mise en œuvre de la transition énergétique.

---

24. Les avis du CETE étaient pour l'instant limités à quelques dizaines de pages.

De l'analyse de ces différents comités, on peut tirer les éléments suivants. L'institution de comités d'expert chargés d'évaluer et de suivre le processus de transition énergétique présente comme principal intérêt d'apporter une expertise indépendante à l'évaluation des scénarios et des politiques publiques proposée par l'administration (voir comparaison dans le [Tableau 3.5](#)). L'évaluation de la transition énergétique passe généralement par celle d'indicateurs de suivi du processus. À la difficulté de leur définition s'ajoute toutefois le manque de données historiques permettant un recul pertinent. L'intérêt d'un indicateur n'est donc confirmé que si les données pour les évaluer sont accessibles facilement et régulièrement. Les comités peuvent en particulier se permettre d'émettre des recommandations et de formuler des critiques sur les objectifs et les trajectoires contrairement à l'administration qui ne peut les formuler vis-à-vis des politiques. Les fonctionnaires peuvent d'ailleurs trouver dans cet intermédiaire un moyen de faire remonter des avis qu'ils ne peuvent transmettre eux-mêmes. Le comité anglais a inspiré de nombreux autres pays (Danemark, Suède, Irlande) qui mettent à leur tour en place des comités d'experts similaires pour surveiller et contrôler leur transition énergétique. La France a ainsi transformé son [CETE](#) en s'inspirant de l'expérience du Royaume-Uni pour créer le Haut conseil pour le climat ([HCC](#)). Chaque pays souhaitant réaliser une transition énergétique bas-carbone cherche ainsi à se doter d'un organisme de contrôle et d'évaluation de ce processus.

TABLE 3.5 – Comparaison des comités d'experts en France, en Allemagne et au Royaume-Uni en 2018

	FRANCE	ALLEMAGNE	ROYAUME-UNI
NOM	Comité d'experts pour la transition énergétique	<i>Commission on the Monitoring Process</i>	<i>Committee on Climate Change</i>
ANNÉES DE CRÉATION - FIN	2015-2018	2011	2008
COMPOSITION DU COMITÉ	<p>EFFECTIF : 8 membres</p> <p>RESSOURCES : Pas de personnel ni de fonds alloué</p>	<p>4 experts</p> <p>Assistants</p>	<p>2 comités :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- adaptation (6 membres)</li> <li>- atténuation (9 membres)</li> </ul> <p>Secrétariat (20-25 personnes) et budget de 4 M€</p>
DOCUMENTS PRODUITS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avis sur les projets de SNBC et PPE</li> <li>- Avis sur le respect des budgets carbone</li> <li>- Avis sur la mise en œuvre de la PPE</li> <li>- Synthèse des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE)</li> </ul> <p>Document succinct (dizaines de page)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avis sur le <i>Monitoring report</i> tous les ans</li> <li>- Avis sur le <i>Strategic report</i> tous les 3 ans</li> </ul> <p>Document de même taille que les rapports</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avis sur les budgets carbone</li> <li>- Rapport annuel sur les progrès réalisés</li> <li>- Rapport approfondi tous les 5 ans</li> </ul> <p>Rapport complet : analyse dans les domaines du changement climatique, de l'économie et des politiques publiques</p>
FONCTIONNEMENT	<p>Rédaction des documents (SNBC, PPE) par le ministère</p> <p>Avis du CETE</p> <p>Pas de réponse formelle du ministère</p>	<p>Rédaction des documents par le ministère</p> <p>Avis du comité</p> <p>Pas de réponse formelle du ministère</p>	<p>Rédaction par le comité des rapports</p> <p>Réponse formelle du gouvernement devant le Parlement</p> <p>Auto-saisissement sur certaines questions</p>
INDICATEURS UTILISÉS	<p>19 indicateurs de résultat et 14 indicateurs de contexte</p> <p>67 indicateurs de suivi des recommandations transversales et sectorielles</p>	<p>12 indicateurs principaux</p> <p>H hiérarchie des indicateurs définis, 65 indicateurs répartis dans 10 catégories (Renouvelables, Efficacité énergétique, Transport, etc.)</p>	<p>16 indicateurs principaux</p> <p>Plus de 100 indicateurs décomposés en <i>Headline, Implementation et Policy milestones</i></p>

### 3.4 INSUFFISANCE DE L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE VIS-À-VIS DES OBJECTIFS CLIMATIQUES

Après avoir décrit les objectifs que la France s'est fixée dans le cadre de la [LTECV](#) ainsi que son cadre de gouvernance, nous souhaitons dans cette partie passer en revue différents éléments permettant d'évaluer si le pays se trouve sur la voie d'une transition énergétique bas-carbone.

#### 3.4.1 L'évolution des demandes de service énergétique

Comme on peut le voir sur la [Figure 3.4](#), la consommation d'énergie finale en France a augmenté depuis les années 1990 dans tous les secteurs (15 % dans le transport et 20 % dans le résidentiel) sauf dans celui de l'industrie dont la consommation a décliné depuis la crise de 2008 (-13 % depuis 1990). Ces tendances peuvent être en partie expliquées par l'évolution des demandes de service énergétique.

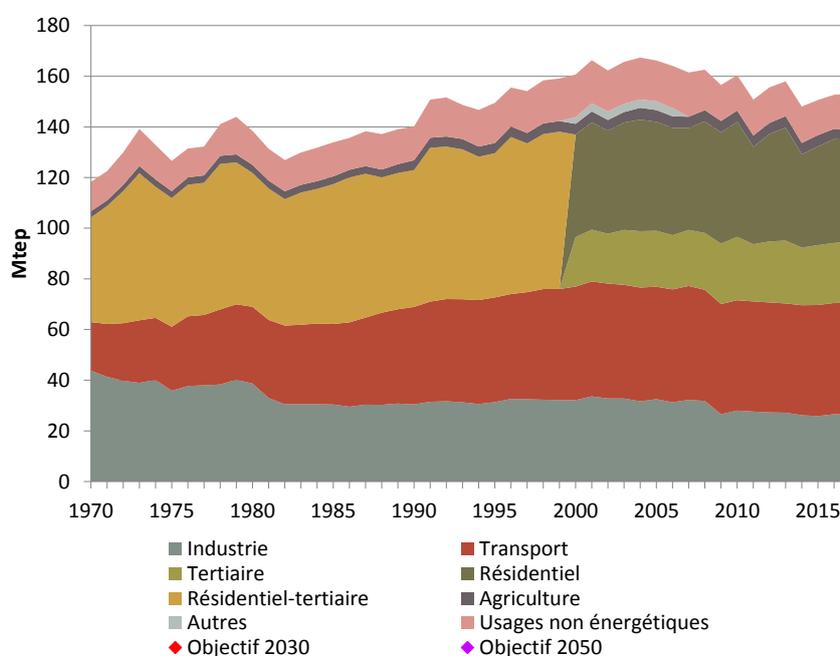


FIGURE 3.4 – Consommation d'énergie finale par secteur en France  
Source : SDES, MTE

Dans le secteur de l'industrie, la production des [IGCE](#) (voir [Figure 3.5](#)) a baissé depuis 1990 dans la plupart des secteurs, avec un choc important lors de la crise de 2008. Depuis la reprise de l'activité, la production est cependant restée stable. En France, les secteurs les plus consommateurs d'énergies sont le secteur de la chimie (19 %), la sidérurgie (15 %) et l'alimentation (17 %) <sup>25</sup>. Le secteur de l'alimentation ne fait pas partie des [IGCE](#) et n'est donc pas représenté sur

25. Ces pourcentages ont été calculés pour l'année 2014, année de référence pour le modèle TIMES-France que nous présenterons et utiliserons dans le [chapitre 4](#).

la [Figure 3.5](#). Concernant le ciment et la sidérurgie, la baisse de la production est particulièrement importante depuis 1990 puisqu'elle s'élève respectivement à 18 et 46 % pour l'année 2017. Si la baisse de la production se poursuit, la consommation d'énergie finale dans le secteur de l'industrie pourrait donc diminuer de façon importante.

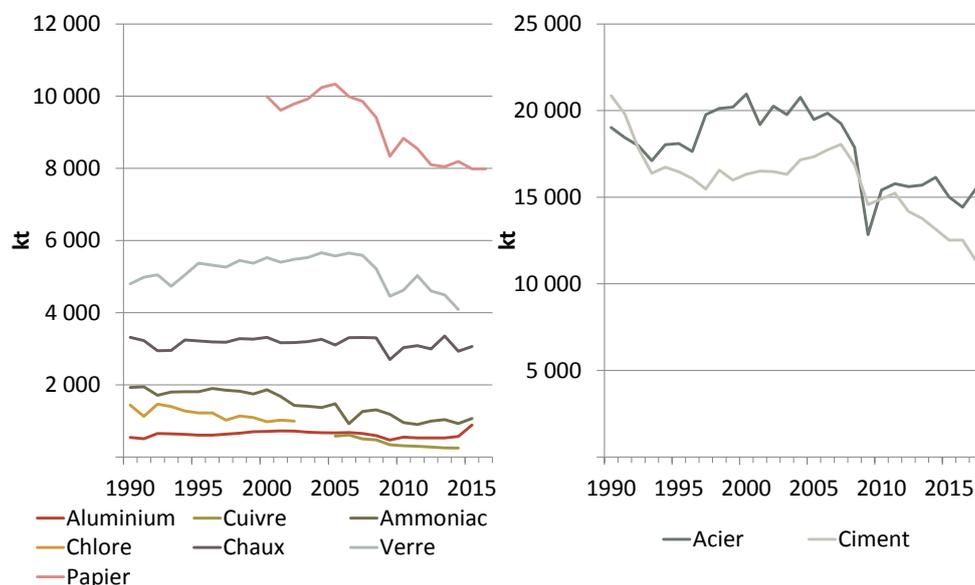


FIGURE 3.5 – Production des IGCE

Source : World Steel Association, Fédération française de l'acier, Association française de l'aluminium, Bilan recyclage ADEME, Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), Société chimique de France, Eurochlor, Infociment, FEDEVERRE, COPACEL

Dans le secteur du transport, les transports de voyageurs et de marchandises (voir [Figure 3.6](#)) sont en augmentation depuis 1990 (de respectivement 29 et 36 %). Pour les marchandises, la croissance a été tirée principalement par le transport routier (+56 %) bien que la crise de 2008 ait eu un fort impact et que son niveau soit resté relativement stable depuis. Les transports de marchandises fluvial et ferroviaire sont quant à eux au contraire plutôt en baisse (-36 et -6 % respectivement) bien que le soutien au fret ferroviaire, décarboné, fasse partie de la SNBC. Concernant le transport de voyageurs, celui-ci est en augmentation aussi bien concernant les véhicules particuliers (+26 %) que les transports collectifs qui regroupent le routier, le ferré et l'aérien (+38 %). Ceci explique en grande partie l'augmentation de la consommation d'énergie observée pour ce secteur. Ainsi, concernant les véhicules particuliers, la tendance à la hausse semble se poursuivre car le nombre de kilomètres parcourus en moyenne par voiture en France a augmenté depuis 2012, alors même qu'il avait baissé sur la période 2000-2012. Par ailleurs, comme précisé précédemment, la consommation unitaire des véhicules neufs ne diminue pas autant que

prévu par l'administration. En 2017, la consommation unitaire était en légère augmentation par rapport à 2016 (6,39 contre 6,36 L/100km). Avec la convergence de la fiscalité essence-diesel, les véhicules essence plus consommateurs et émetteurs sont en effet favorisés lors de l'achat, ce qui explique l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules neufs vendus en France observée par l'ADEME (2019a).

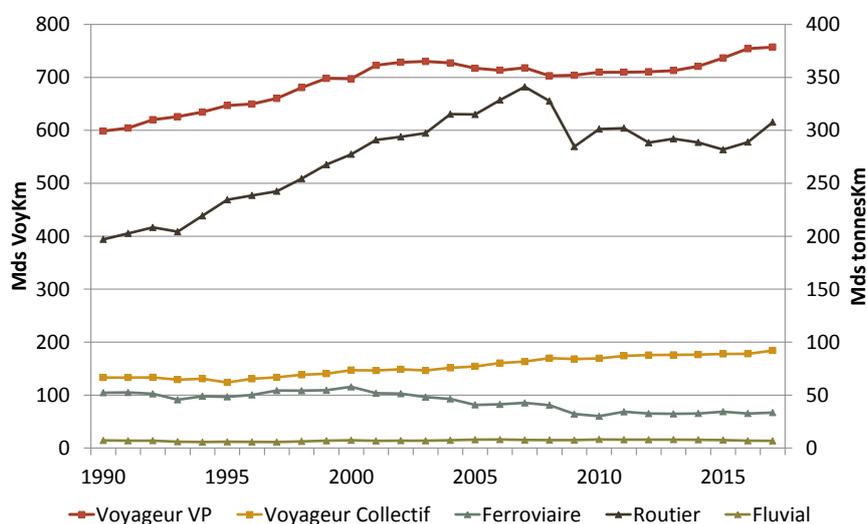


FIGURE 3.6 – Évolution du transport de voyageurs et de marchandises

Source : Comptes des transports de la Nation en 2017

VP : véhicule particulier

Dans le secteur du résidentiel, l'augmentation de la surface totale due à la croissance de la population et à la hausse de la surface par habitant (voir Figure 3.7) entraîne celle de la consommation d'énergie. Celle-ci est en partie compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des appareils consommant de l'électricité (RTE, 2017a ; CEREN, 2018a). Les mêmes tendances sont observées dans le secteur tertiaire (voir Figure 3.8) où la consommation d'énergie augmente chaque année, de 1 % en moyenne depuis 2000. La surface totale des bâtiments a augmenté de 47 % depuis 1990, principalement tirée par celle des bureaux et du sport, loisirs, culture (71 % dans ces deux branches) tandis que la consommation finale d'énergie par m<sup>2</sup> a diminué depuis le début des années 2000 (CEREN, 2018b). Cependant, le développement d'équipements énergivores comme les outils numériques ou la climatisation pourrait à l'avenir participer à une hausse plus importante de la consommation d'énergie.

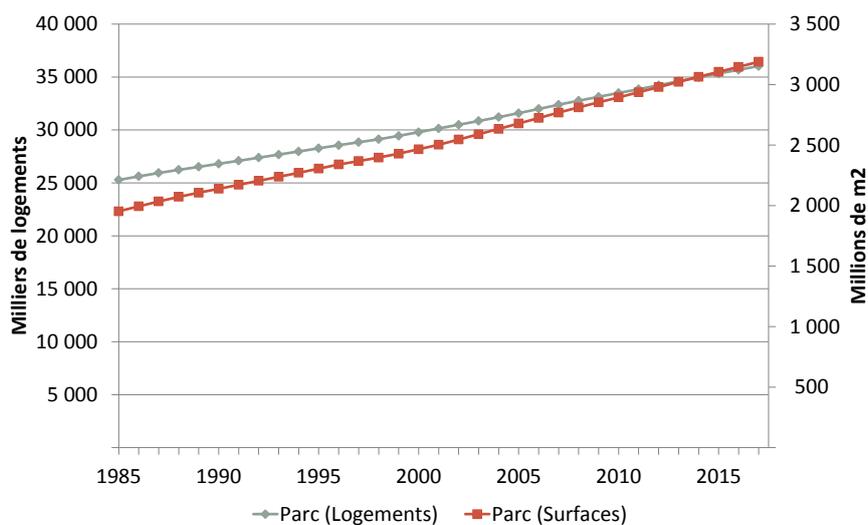


FIGURE 3.7 – Évolution du parc dans le secteur résidentiel  
 Source : Compte satellite du logement (SDES, 2018b)

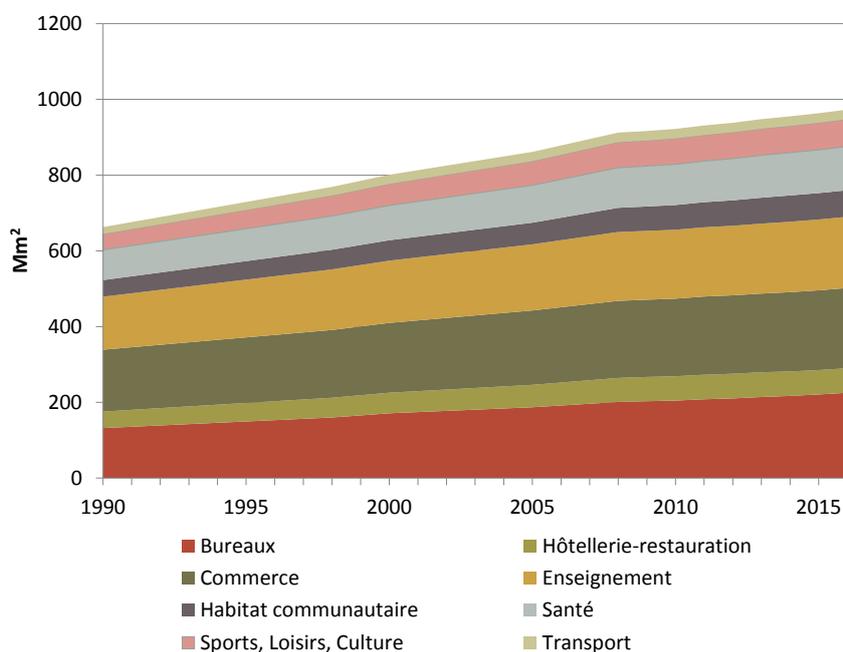


FIGURE 3.8 – Évolution des surfaces dans le secteur tertiaire  
 Source : CEREN, ADEME

## 3.4.2 L'évolution du mix énergétique

En France, le mix énergétique s'est fortement décarboné entre 1970 et aujourd'hui. En 1970, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire (voir Figure 3.9) s'élève à 90 % avec une part importante de charbon (23 %). Le pays possède alors des ressources minières pouvant fournir une énergie bon marché. En 1970, la production de charbon est cependant bien inférieure à celle des années 1960 qui atteignait alors son maximum à 60 Mt. Le charbon est utilisé dans le secteur industriel, principalement dans la métallurgie, dans le secteur du bâtiment et pour la production d'électricité. Importé en quasi-totalité, le pétrole est utilisé dans tous les secteurs. Enfin, le gaz, dont une part de l'approvisionnement est couvert par le gisement de Lacq découvert en 1951, est employé dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment. Pour les combustibles fossiles, la France a donc un portefeuille diversifié grâce, en partie, à ses ressources nationales. Concernant les autres vecteurs énergétiques, elle a développé l'énergie hydraulique après la Seconde Guerre mondiale et utilise environ 9 Mtep de biomasse principalement dans le secteur résidentiel.

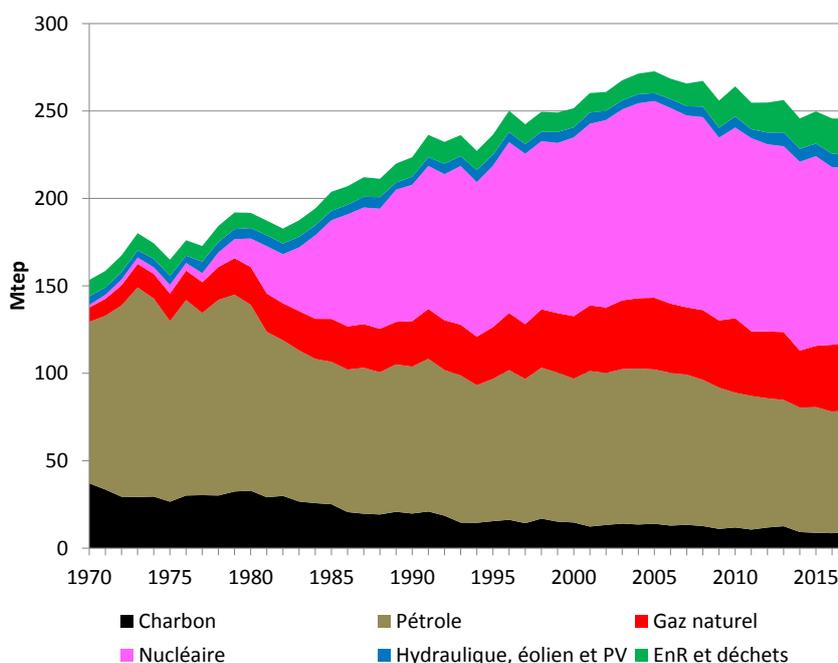


FIGURE 3.9 – Consommation d'énergie primaire en France

Source : SDES, MTES

De 1970 à 2015, la consommation d'énergie primaire augmente de 63 %. La part des combustibles fossiles diminue et atteint 47 % du total avec une quasi-disparition du charbon<sup>26</sup> qui représente 3 % du total en 2015. Sa consommation a diminué principalement dans le secteur de

26. La production de charbon français a cessé en 2004.

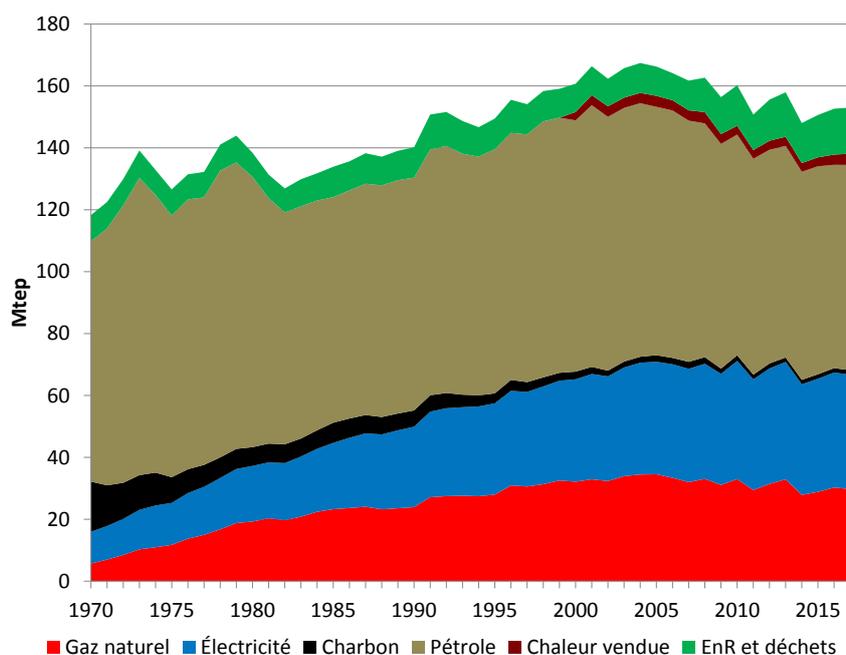


FIGURE 3.10 – Consommation d'énergie finale en France

Source : SDES, MTES

l'électricité et de la sidérurgie (en raison de la baisse de la production d'acier) et est maintenant principalement limitée à ce second secteur. La consommation de pétrole a augmenté entre 1970 et 1980 de 15 % puis a diminué suite au choc pétrolier. Jusqu'en 2008, elle est restée stable autour de 85 Mtep, puis, après la baisse occasionnée par la crise, elle s'est stabilisée autour des 70 Mtep depuis 2012. En effet, la diminution de sa consommation dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment a été compensée par une augmentation dans les transports. La part du gaz dans la consommation d'énergie primaire a augmenté grâce aux importations et est restée relativement stable, autour de 15 % depuis les années 2000. Le gaz est principalement consommé dans l'industrie, mais également dans le secteur des bâtiments, où son utilisation s'est généralisée depuis les années 1970. Enfin, comme expliqué précédemment, la consommation d'électricité d'origine nucléaire a fortement augmenté à partir de 1970 avec le déploiement d'un parc de centrales nucléaires. La part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie (voir [Figure 3.10](#)) est passée de 9 % en 1970 à 25 % en 2015. L'amélioration de l'exploitation des ressources hydrauliques a permis de maintenir la part de l'hydroélectricité dans la consommation d'énergie primaire constante, à 3 %. Enfin, celle des bioénergies a faiblement augmenté, de 6 à 7 % entre 1970 et 2015. En effet, dans le secteur résidentiel, les énergies renouvelables - principalement le bois-énergie - ont décliné de 1990 jusqu'au milieu des années 2000, même si elles augmentent à nouveau depuis.

Par ailleurs, si le PIB par habitant a augmenté de près de 32 % entre 1990 et 2017, les émissions de GES ont baissé de 17 % (voir Figure 3.11). La consommation d'énergie primaire par habitant a légèrement baissé de 4 à environ 3,8 Mtep/hab, tout comme celle d'énergie finale (2,3 à 2,1 Mtep/hab).

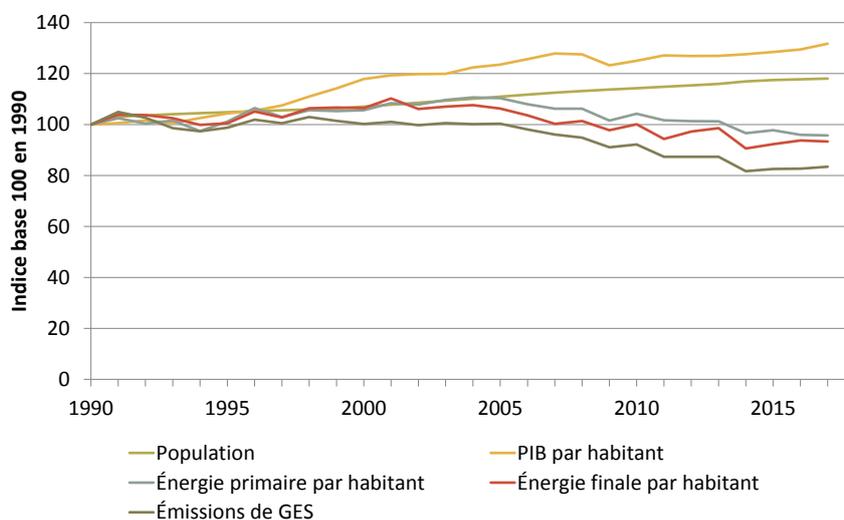


FIGURE 3.11 – Évolution d'indicateurs en France

Source : SDES, MTES, Eurostat, Insee, CITEPA

Les principales évolutions du système énergétique français sont l'augmentation de la consommation de gaz et le développement de l'énergie nucléaire. Bien qu'elle soit récente, la hausse de la production primaire d'énergies renouvelables est très importante puisqu'elle a augmenté de 40 % entre 2007 et 2015. Les importations d'énergie ont considérablement augmenté entre 1970 et 2008 (+42 %) mais ont baissé depuis. Elles représentent toutefois encore près de 60 % de la consommation primaire d'énergie. Les évolutions sectorielles du mix énergétique sont présentées dans l'Annexe D.

### 3.4.3 L'évolution des émissions de GES et CO<sub>2</sub>

Pour analyser l'évolution des émissions de GES, il est important de bien distinguer les types d'émissions : les émissions de GES qui représentent l'ensemble des gaz à effet de serre et s'expriment en MtCO<sub>2</sub>eq, les émissions CO<sub>2</sub>, et les émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion des énergies<sup>27</sup>. Les émissions CO<sub>2</sub> représentent 74 % des émissions de GES en 2016 et les émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion des énergies représentent 92 % des émissions CO<sub>2</sub> et 68 % de l'ensemble des émissions de GES.

27. Dans le modèle TIMES-France que nous utilisons, nous représentons uniquement ces émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion des énergies.

Pour la suite, nous nous intéresserons aux émissions de GES et CO<sub>2</sub> hors Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF). Les émissions liées à l'aviation internationale sont généralement présentées à part dans les inventaires nationaux. Dans les graphiques présentés (Figure 3.12 et Figure 3.13), ces émissions ne sont donc pas représentées.

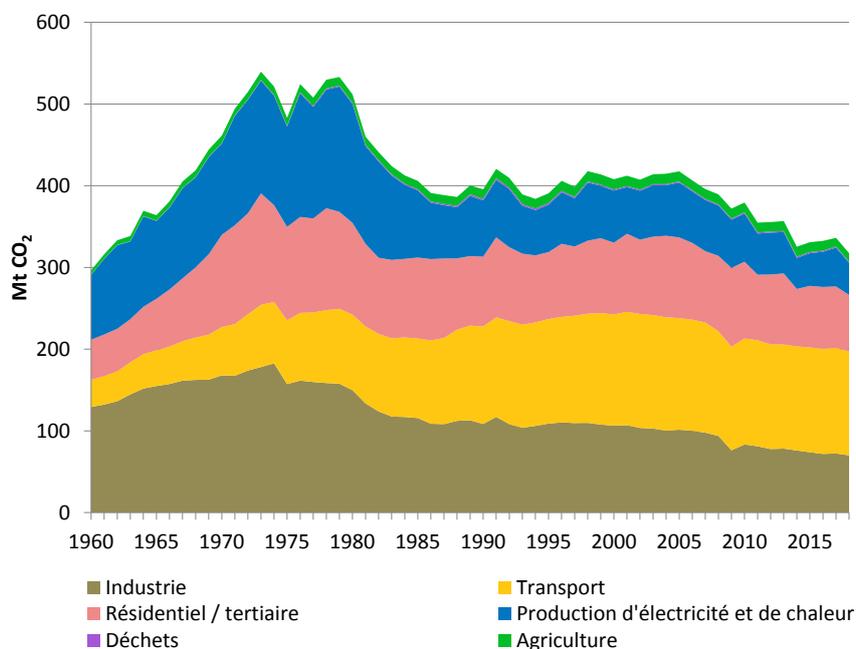


FIGURE 3.12 – Évolution des émissions CO<sub>2</sub> en France, hors UTCATF

Source : CITEPA, inventaire 2018, format SECTEN

L'évolution des émissions CO<sub>2</sub> (Figure 3.12) montre que celles-ci ont considérablement diminué depuis les années 1970. Elles sont fortement liées à l'activité économique et baissent brutalement lors des grandes crises économiques (la crise pétrolière de 1973 par exemple ou plus récemment la crise des subprimes en 2008).

Des années 1990 à 2005, les émissions CO<sub>2</sub> ont augmenté de 5 % tandis que les émissions de GES (voir Figure 3.13) sont restées stables. Malgré les engagements pris par la France dès 1997, il n'y a pas eu de décroissance des émissions<sup>28</sup>. Toutefois à partir de 2005, une diminution s'amorce aussi bien du point de vue des émissions CO<sub>2</sub> que GES. Dans tous les secteurs, excepté le transport de voyageurs, on peut observer une baisse des émissions. Au total, les émissions de GES ont diminué de 20 % en 2018 par rapport à 1990 (et de 11 % pour les émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion des énergies) alors que le PIB a augmenté de près de 52 %.

28. S'il n'y a pas eu de diminution des émissions, elles n'ont pas non plus augmenté comme cela aurait pu se produire si le système énergétique n'avait pas évolué compte tenu des effets de la croissance de la population et de l'augmentation du Produit intérieur brut (PIB).

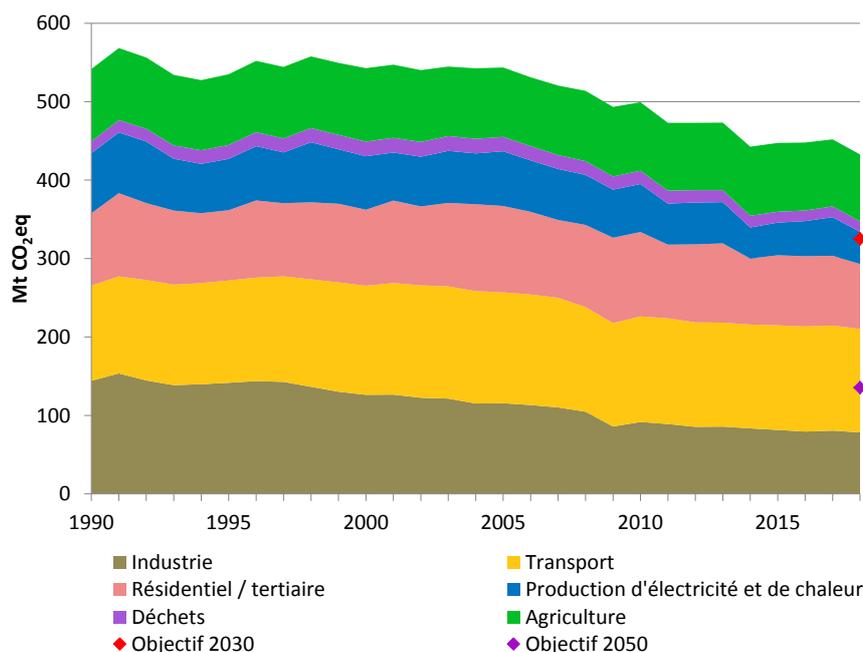


FIGURE 3.13 – Évolution des émissions de GES en France, hors UTCATF

Source : CITEPA, inventaire 2018, format SECTEN

Les principaux secteurs qui ont contribué à la baisse des émissions sont l'industrie et la production d'électricité et de chaleur (respectivement -46 et -47 % en 2018 par rapport à 1990), les autres secteurs ont diminué leurs émissions de façon très modérée (-10 % pour le résidentiel et -8 % pour l'agriculture) tandis que les émissions du secteur du transport ont augmenté de 9 % en 2018 par rapport à 1990.

Revenons brièvement sur les raisons de la décroissance des émissions CO<sub>2</sub> observée à partir de 2005. Les analyses s'appuient le plus souvent sur l'identité de Kaya (SPENCER et al., 2017; HENRIQUES et BOROWIECKI, 2017; RIEDINGER, 2018; ÉCOIFFIER, 2017) :

$$CO_2 = Pop \times \frac{PIB}{Pop} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{CO_2}{E} \quad (3.1)$$

avec CO<sub>2</sub>, les émissions de GES; *Pop*, la population et *E*, la consommation d'énergie primaire. L'identité de Kaya permet donc d'exprimer les émissions comme le produit de la population, du PIB par habitant, de l'intensité énergétique du PIB et du contenu carbone de l'énergie. On notera que, généralement, les politiques cherchent à augmenter le PIB par habitant. Comme la population a tendance à augmenter (dans la plupart des pays), il faut alors agir sur l'intensité énergétique du PIB et sur le contenu carbone de l'énergie.

D'après RIEDINGER (2018), ces différents éléments ont évolué de la façon suivante depuis les années 1990 : l'intensité énergétique de l'économie a diminué de 26 % ainsi que l'intensité carbone de la consommation d'énergie primaire (de 25 %) ce qui a permis de

compenser l'augmentation du PIB par habitant (+29 %) ainsi que la croissance démographique (+14 %).

En reprenant les analyses faites par ÉCOIFFIER (2017) et RIEDINGER (2018) qui se basent toutes deux sur la méthode dite « LMDI » (*logarithm mean division index*)<sup>29</sup>, la baisse des émissions dans les différents secteurs peut être expliquée de la façon suivante. Dans le secteur productif, la décroissance des émissions est due pour près de la moitié à la tertiarisation de l'économie (près d'un tiers pour ÉCOIFFIER (2017)). La délocalisation de la production a également joué. En effet, l'industrie manufacturière a amélioré son efficacité énergétique depuis 1990 mais a aussi considérablement diminué ses niveaux de production depuis la crise de 2008. L'amélioration de ses procédés de fabrication est par ailleurs plus marquée depuis cette date.

Dans le transport de marchandises, la diminution de l'activité depuis la crise de 2008 est le principal facteur explicatif de la baisse des émissions. En effet, jusqu'à la crise, les émissions étaient en augmentation et ont atteint leur pic en 2007. L'augmentation de la part modale des poids lourds contribue toutefois à augmenter les émissions. Malgré les discours visant à favoriser le fret ferroviaire dans le transport de marchandises (MEDDE, 2015, voir la SNBC1), le recours au fret est en déclin depuis une vingtaine d'années. Dans le transport de voyageurs, les émissions ont peu augmenté depuis 1990 ce qui s'explique par des facteurs aux effets opposés. Si la part modale de la route a légèrement diminué, le nombre moyen de passagers par véhicule a lui diminué (1,78 en 1990 à 1,58 en 2016). La réduction des émissions est principalement due à l'incorporation de biocarburants ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique des voitures particulières.

Dans le secteur résidentiel, les émissions ont commencé à diminuer à partir de 2009, principalement grâce à la diminution du recours au pétrole et au charbon ainsi qu'à la stabilisation de la consommation d'énergie par  $m^2$  (ADEME, 2018a). La consommation liée au chauffage diminue depuis 2009 malgré l'augmentation du nombre de logements et la hausse de leur surface moyenne. Enfin, concernant la production d'énergie, les émissions ont légèrement baissé depuis 1990 grâce au développement du nucléaire durant cette première décennie puis à la progression des énergies renouvelables depuis 2005.

Pour rappel, dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'était engagée à ne pas augmenter ses émissions en 2010 par rapport à 1990. L'objectif est donc respecté. Cependant, pour envisager un « Facteur 4 » de réduction des émissions, ou même la neutralité carbone, les émissions doivent baisser beaucoup plus fortement et rapidement. Le premier budget carbone défini dans la SNBC1 pour la période 2015-2018 n'a ainsi pas été respecté puisque, rappelons-le, il est prévu

29. Cette méthode décompose les émissions CO<sub>2</sub> suivant différents facteurs comme l'intensité énergétique ou les effets de structure ou de climat.

que le dépassement s'élève à 72 MtCO<sub>2</sub>eq sur l'ensemble de la période (soit +4 %) (MTES, 2018).

Le constat que les émissions ne baissent pas assez rapidement et que les politiques mises en œuvre sont insuffisantes a été souligné à de multiples reprises par la COUR DES COMPTES (2013), le CESE (VIRLOUVET, 2015) pour qui la baisse des émissions est en partie due à la crise financière de 2008 et, dernièrement, par le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) (DOUARD et al., 2017) pour qui « l'essentiel des efforts reste encore à faire » pour le « Facteur 4 ». L'effort à faire pour un objectif de neutralité carbone est donc a fortiori plus important. Enfin, si on se réfère à l'évolution de l'empreinte carbone, le constat est encore plus négatif puisque celle-ci a augmenté jusqu'en 2010 et n'a que très légèrement décliné depuis, passant de 708 MtCO<sub>2</sub>eq en 2010 à 698 en 2016 (CGDD et BAUDE, 2018).

Le constat de ces dernières années est particulièrement préoccupant car la diminution des émissions observée en 2014 est due à un contexte particulièrement favorable avec un hiver très doux et une forte disponibilité des centrales nucléaires. Après trois années consécutives d'augmentation, un renversement de tendance s'est produit en 2018. Toutefois, cette baisse est une nouvelle fois due en grande partie à un hiver doux et à la bonne disponibilité des centrales nucléaires. Les épisodes de diminution relèvent donc plus de conditions conjoncturelles que structurelles. L'État ne semble ainsi pas avoir su mettre en place les outils de gouvernance, le cadre réglementaire et les incitations économiques suffisantes (avec des transferts adéquats) pour provoquer un changement ou une inversion durable de la tendance à la stabilisation voire l'augmentation des émissions.

### 3.5 CONCLUSION

La politique énergétique française a beaucoup évolué depuis la crise de 1973 mais elle est principalement guidée par des intérêts économiques (croissance du PIB, préservation de l'emploi, limitation des dépenses énergétiques pour l'importation). Dans une première période de 1970 à 1990, cette politique se focalise sur l'indépendance énergétique. Elle est également marquée par une intervention constante de l'État (REVOL, 1998). L'effort principal est centré sur le programme nucléaire afin de favoriser l'indépendance énergétique. Les autres mesures concernant le contrôle de la consommation d'énergie ne font pas partie du cœur de la vision énergétique future<sup>30</sup>. De plus, le processus de prise de décision est opaque, concentré dans les élites administratives du pays au détriment du pouvoir politique ce qui a conduit selon FINON (1996) à certaines erreurs comme la surcapacité

30. Les efforts pour maîtriser la consommation d'énergie avec notamment la création de l'Agence française de la maîtrise de l'énergie se sont rapidement estompés.

du parc nucléaire, ou le coût social élevé dû au sur-investissement dans le charbon dans les années 1950. Parallèlement, l'institutionnalisation de l'environnement permet de préparer la prise en compte des préoccupations envers le changement climatique à partir des années 1990.

Durant une seconde période, de 1990 jusqu'à aujourd'hui, la politique énergétique intègre les contraintes climatiques et se rapproche de la politique environnementale à travers la création d'un ministère de l'Écologie et du Développement durable en 2008. La politique énergétique se construit également en réponse à celle de l'Union européenne. Depuis 2012, la France cherche à confirmer sa place de leader environnemental comme lors de l'organisation de la COP 21 à Paris en 2015. Elle adopte des objectifs ambitieux au travers de la LTECV en 2015 et plus récemment, avec la publication d'un Plan Climat (MTES, 2017) dans lequel un objectif de neutralité carbone pour 2050 est annoncé. Depuis l'adoption du PNLCC en 2000, tous les cinq ans environ, une nouvelle loi ou un nouveau plan structurant la politique énergétique est adopté : PNLCC en 2000, loi POPE en 2005, lois Grenelle en 2009-2010, LTECV en 2015 et une nouvelle loi actuellement en préparation pour prendre acte du nouvel objectif de neutralité carbone ainsi que du report de la date de diminution du nucléaire dans le mix électrique. Cette profusion réglementaire est un travers du *targetism* (GEDEN, 2015). Ce terme proposé par Oliver Geden souligne la propension des gouvernements à adopter sans cesse de nouveaux objectifs, toujours plus ambitieux. Au lieu de renforcer les moyens pour atteindre les objectifs fixés, on préfère les repousser à une date ultérieure voire les rehausser. Pour RUMPALA (2008), le pilotage par les objectifs et les résultats ne garantit pas la maîtrise du changement et « s'apparente une gestion de la non-durabilité ».

La politique énergétique française a donc suivi plusieurs objectifs qui ont évolué au cours du temps. Faisant suite à la crise de 1973, le renforcement du programme nucléaire avait pour objectif d'assurer l'indépendance énergétique, la diversification des approvisionnements mais surtout de diminuer la facture énergétique liée à la consommation de pétrole. En France, la seule transition énergétique permettant de diminuer les émissions CO<sub>2</sub> qui s'est produite depuis la Seconde Guerre mondiale correspond à ce passage au nucléaire. La politique énergétique française s'est ainsi focalisée sur cette énergie dont le succès du déploiement s'explique par la puissance des alliances administratives et industrielles, très isolées de l'arène politique (FINON, 1996). Cette symbiose s'est en partie effritée depuis quelques dizaines d'années et cette caractéristique n'est plus présente pour la transition énergétique bas-carbone.

Les contraintes environnementales ont ensuite été intégrées progressivement à la politique énergétique. Depuis les années 2000, la France cherche à mener une transition énergétique avec l'adoption

de la réduction des émissions de GES comme principal objectif. Hors UTCATF, elles ont commencé à diminuer à partir de 2006 et ont atteint -20 % en 2018 par rapport à 1990. Cette réduction est bien en ligne avec l'objectif de 2020 mais pas avec celui de 2030, à savoir une baisse des émissions de 40 %. Si on considère que l'action climatique a véritablement débuté dans les années 2000, il aura fallu 20 ans pour baisser de 20 % les émissions de GES alors que les premières tonnes sont généralement considérées comme les plus faciles et les moins coûteuses à supprimer. Cette diminution est par ailleurs due en partie à la crise économique de 2008. L'objectif de baisser de 20 points supplémentaires les émissions de GES en 10 ans (et sans crise économique bien sûr) semble donc très ambitieux, étant données les inerties du système énergétique.

Les politiques mises en œuvre jusqu'à aujourd'hui n'ont donc pas véritablement permis d'initier la transition énergétique telle qu'envisagée officiellement par le gouvernement français. En reprenant la typologie de GEELS et SCHOT (2007) (voir sous-section 1.4.1), on peut assimiler cet état à celui de *reproduction process*, c'est-à-dire un état qui est dynamiquement stable. Le régime socio-technique reste à l'équilibre de manière dynamique, en adoptant des innovations incrémentales qui entraînent des micro-reconfigurations du système mais sans reconfiguration totale du régime. Si les résultats sont limités en matière de baisse des émissions de GES, on note une augmentation des énergies renouvelables depuis les années 2000. Leur contribution à la baisse des émissions est toutefois limitée et relève en partie de la situation de crise économique traversée à partir de 2008. Jacques Theys constate que « ce qui a été fait n'a pas permis encore d'engager résolument la France vers une transition énergétique ou écologique comparable au virage pris dans beaucoup de pays du Nord de l'Europe... Dans beaucoup de domaines, nous restons au milieu du gué » (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a). Pour LACROIX et ZACCAÏ (2010), plusieurs secteurs comme le transport, l'aménagement ou l'agriculture n'ont pas été suffisamment investis. À l'exception de la pollution industrielle, les politiques publiques n'ont pas conduit à une amélioration de l'état de l'environnement qui s'est au contraire dégradé. Si ce constat a été fait pour l'environnement de manière générale, il s'applique aussi bien pour le système énergétique, objet de la transition énergétique. Les différents cycles des politiques énergétiques conduisent à des « phases d'impulsion institutionnelle » avec quelques avancées sectorielles qui ne permettent pas véritablement d'engager une transition énergétique, une rupture dans l'évolution du système énergétique.

De notre point de vue, ces phases d'impulsion sont analogues à l'application d'une loi de contrôle de type bang-bang<sup>31</sup> pour opérer la régulation d'un système en boucle ouverte. Or, il s'avère que la

31. Le contrôle bang-bang ou tout ou rien signifie que le contrôle ne peut prendre que deux types d'état : prise en compte ou non prise en compte de l'information.

régulation en boucle ouverte n'est pas adaptée aux ambitions de décarbonation. En effet, plusieurs facteurs explicatifs peuvent être avancés pour comprendre les difficultés auxquelles la politique énergétique doit faire face. Tout d'abord, le projet de transition énergétique qui doit s'inscrire dans un plan plus vaste de transition écologique prenant en compte les enjeux économiques et sociaux n'est pas clairement défini. Ce manque de vision pour l'avenir nuit à la définition d'objectifs clairs et cohérents. Une grande partie du débat est monopolisée par la place du nucléaire dans le mix de production électrique, au détriment des autres enjeux sectoriels (aménagement du territoire, mobilité, chauffage dans le secteur des bâtiments). Ce débat n'est toujours pas clairement tranché comme en témoignent les atermoiements à chaque publication de Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) censée définir l'évolution des principaux vecteurs énergétiques. Pour Jacques Theys, s'il n'y a pas eu de rupture dans la politique énergétique, c'est « parce qu'il n'y avait pas d'accord au sein du gouvernement sur la stratégie à suivre en matière de politique industrielle et que le Grenelle, en réalité, impliquait ce choix » (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a). Suite au DNTE et à la LTECV, le même constat s'impose. Il n'y a pas eu de clarification du projet de transition énergétique puisqu'un « consensus ambigu » s'est instauré (EVRARD, 2014) et aucune rupture dans la politique industrielle et énergétique ne s'est produite. Pour reprendre AYKUT et EVRARD (2017), la transition en France consiste surtout à ne rien changer, et en particulier « le modèle économique et industriel centralisé, interventionniste et technocratique » à l'origine du choix du nucléaire. Le projet actuel concernant l'environnement est essentiellement marqué par le mouvement de modernisation écologique qui a influencé les politiques depuis le milieu des années 2000 (BÉAL, 2016). L'objectif de croissance verte s'inscrit ainsi pleinement dans ce paradigme.

D'autre part, la politique énergétique est conçue de façon très sectorielle sans politique transversale commune à tous les ministères. Cette approche sectorielle peut être efficace si les mesures sont précises et si les objectifs sont clairs (VIRLOUVET, 2015). Cependant, la prise en compte de l'enjeu climatique est variable suivant les secteurs. Pour l'aménagement du territoire, il y a par exemple peu d'objectifs opérationnels alors qu'il s'agit d'un des domaines clés pour la réduction des émissions de GES. La COUR DES COMPTES (2014) pointe également l'insuffisance de pilotage interministériel. La politique énergétique semble ainsi complexe et difficilement lisible avec une multiplicité des textes, des horizons et des objectifs. Les politiques publiques souffrent également de leur manque de cohérence concernant l'enjeu du changement climatique. Celui-ci nécessite pourtant une politique transversale qui développe une vision de long terme. Concernant l'environnement, des améliorations ont bien eu lieu mais le manque d'intégration dans les différentes politiques sectorielles a conduit à des dégradations

durables (LACROIX et ZACCAÏ, 2010). La politique énergétique reste ainsi conditionnée à l'atteinte d'objectifs économiques et reste attachée à un modèle *business as usual*.

La politique énergétique doit également faire face au problème de la temporalité : une transition énergétique demande du temps. Des objectifs ambitieux ont été adoptés pour 2030 et 2050 ce qui nécessite un accompagnement important. Malgré certaines avancées, le temps manque aux politiques publiques pour engager les ruptures nécessaires (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a).

Les politiques publiques cherchent par ailleurs à contrôler la transition énergétique. La réussite de la transition vers le nucléaire dans les années 1970 s'était en partie appuyée sur des méthodes de planification et de prospective. Depuis les années 2000, la libéralisation du secteur énergétique pose la question du contrôle par les pouvoirs publics. Le marché libéralisé suppose une libre concurrence entre les différents acteurs mais les énergies décarbonées nécessitent actuellement des subventions ou une garantie financière de l'État, que ce soit pour l'énergie nucléaire ou les énergies renouvelables (PV, éolien, biogaz). L'État est alors placé dans une position ambiguë puisqu'il veut garder le contrôle de sa politique énergétique en fixant des objectifs stratégiques pour les différents vecteurs énergétiques mais doit en même temps promouvoir la concurrence entre les différents acteurs. Les bénéfices vantés par la libéralisation du secteur de l'énergie n'ont pas eu lieu, en particulier pour les consommateurs qui ont vu les tarifs augmenter (HANSEN et PERCEBOIS, 2017). En effet, la libéralisation rend le coût plus visible pour les citoyens ce qui met en exergue la question du coût que la société est prête à payer (POLLITT, 2012). Les politiques nationales sont également soumises aux objectifs européens alors que la cohérence entre les politiques de lutte contre le changement climatique et la régulation des marchés énergétiques à l'échelon européen est discutable. Pour Jacques Theys (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a), le recours à la notion de transition est une sorte de substitut à l'approche de la planification : « La notion de "transition", très à la mode aujourd'hui, cherche un peu à répondre à la question : comment mener collectivement des changements à long terme quand la planification a disparu ? »

Malgré toutes ces difficultés, des évolutions positives ont tout de même été amorcées. En matière d'environnement, des progrès dans le traitement des pollutions sont observés (LACROIX et ZACCAÏ, 2010). L'environnement est d'ailleurs l'un des nouveaux domaines de l'action publique, apparu en 1970 (BARRÉ, LAVOUX et PIVETEAU, 2015a) et qui fait partie d'un des ministères les plus importants. Concernant le système énergétique, la limitation de la consommation d'énergie n'était plus une préoccupation dans les années 1990 mais, depuis le début des années 2000, l'attention croissante portée au changement climatique a renouvelé l'intérêt pour la réduction des consommations

d'énergie. Des mesures ont été mises en place pour la limiter (certificat d'économie d'énergie, normes de construction, consommation des véhicules, etc.) mais au niveau national, leurs effets sont pour l'instant restreints ou insuffisants. Dans le secteur résidentiel-tertiaire toutefois, la consommation d'énergie est stable depuis quelques années, notamment grâce aux mesures d'efficacité énergétique et aux normes de chauffage pour les nouvelles constructions. Enfin, les structures de la gouvernance de la transition énergétique ont récemment été modifiées avec la mise en place d'un Haut conseil pour le climat (HCC) en 2018. Il est encore trop tôt pour estimer les résultats concrets de ce changement.

Depuis 2012, l'objectif de la politique énergétique française est d'initier une transition énergétique. Malgré une politique qui s'affiche ambitieuse avec notamment un objectif de neutralité carbone en 2050, force est de constater qu'elle a eu un impact minime puisque la plus grande partie de ses bons résultats en matière d'émissions de GES provient du parc nucléaire, programme lancé dans les années 1970 tandis qu'une autre partie de la réduction observée des émissions est due à la crise économique. La transition énergétique bas-carbone n'a donc pas véritablement commencé et reste pour l'instant plus proche d'un modèle *business as usual*, sans véritable reconfiguration du régime. L'enjeu climatique n'est pas au centre des politiques menées ce qui conduit à sa marginalisation et à un manque de cohérence des politiques publiques prônées. Les objectifs de la transition énergétique ne sont donc pas centraux pour la détermination des autres politiques. Si l'on peut toutefois noter quelques avancées depuis que les préoccupations envers le changement climatique ont émergé, les changements insufflés restent malgré tout très timides au regard de la rapidité des transformations nécessaires. La politique énergétique reste soumise aux mêmes impératifs économiques, soutien de la croissance ou de l'emploi, que par le passé, lors du déploiement du programme électro-nucléaire. Ces observations nous renvoient aux conclusions tirées de notre analyse rétrospective des transitions passées ([chapitre 2](#)) : on peut les interpréter comme le résultat qu'aurait le contrôle en boucle ouverte d'un système pour lequel la consigne n'est pas très clairement définie. Ce pilotage n'ayant pas d'objectif précis, le contrôle de la trajectoire est incertain tout comme l'enjeu même de la transition. En France, l'évolution actuelle du système énergétique et l'analyse du statut de la transition énergétique nous ont conduits à ce constat. Il est donc impératif de mettre en place un système de pilotage en boucle fermée spécifiant clairement la consigne à atteindre afin que la synthèse d'une « loi de contrôle » efficace pour une transition vers un système décarboné soit réalisable. C'est ce type de contrôle que nous proposons d'élucider pour le cas français dans le chapitre suivant, en nous appuyant sur un outil puissant d'analyse, un modèle de prospective long terme.

## QUEL FUTUR POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE EN FRANCE ?

---

*Un futur désirable,  
La tribune du refus*

— Jacques Perry-Salkow

De notre observation et analyse des transitions passées, il est apparu que pour réaliser une transition énergétique bas-carbone, il soit nécessaire de mettre en place un pilotage en boucle fermée. Jusqu'à aujourd'hui la France a renforcé sa politique énergétique et climatique en adoptant des objectifs de plus en plus ambitieux. Leur traduction concrète au niveau du système énergétique et en particulier, en matière de baisse des émissions de GES, est pour l'instant limitée et démontre en fait l'inefficacité de l'empilement de mesures appliquées en boucle ouverte. Dans cette optique, nous poursuivons l'idée qu'il est nécessaire d'élaborer des contrôles qui permettent de garantir que la consigne de décarbonation soit atteinte en mettant en place un pilotage efficace.

Nous proposons ici d'explorer dans quelle mesure les outils économiques envisagés par la communauté des économistes sont adaptés à cette ambition de pilotage. Nous apportons cet éclairage original via le déploiement d'un modèle de prospective énergétique. Il s'agit du modèle TIMES-France, un modèle bottom-up d'optimisation du système énergétique (voir [Annexe A](#)) qui permet d'explorer les futurs possibles de ce dernier et de réfléchir aux enjeux liés à la décarbonation grâce à une représentation très détaillée des technologies actuelles et futures.

Dans une première partie, nous utilisons ce modèle pour évaluer la taxe sur les émissions nécessaire pour atteindre un objectif de neutralité carbone. Ces travaux dérivent de la mise en œuvre du modèle TIMES-France dans le cadre de la commission Quinet visant à mettre à jour l'évaluation de la valeur tutélaire du carbone. Notre contribution a été publiée dans le rapport de la commission *La valeur de l'action*

---

. Dans le [chapitre 4](#), la partie présentant une évaluation de la taxe carbone est tirée des travaux réalisés dans le cadre de la commission Quinet qui a abouti à la publication du rapport *La valeur de l'action pour le climat* (QUINET et al., 2019). L'étude des trajectoires du système énergétique français conduisant à la neutralité carbone ou aux objectifs de la LTECV ont bénéficié des discussions et du cadre accueillant du Bureau des émissions, projections et modélisations (BEPM), dirigé par Gilles Croquette, à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) du ministère de la Transition écologique et solidaire. Enfin, l'analyse comparative entre la France et la Suède a été menée en collaboration avec Anna Krook-Riekkola de l'université de Luleå en Suède.

*pour le climat* (QUINET et al., 2019). Les résultats du modèle conduisent à des niveaux de taxe particulièrement élevés qu'il sera donc difficile d'appliquer, même avec des mesures de redistribution pour en assurer son acceptabilité sociale. Dans une deuxième partie, pour compléter l'analyse économique, nous nous concentrons sur l'exploration des trajectoires menant à la neutralité carbone. Nous évaluons ainsi les différences entre une trajectoire satisfaisant la neutralité carbone et une trajectoire compatible avec les objectifs de la LTECV. Nous explicitons les difficultés de la réalisation de l'objectif très ambitieux de neutralité carbone, qui implique des changements du système énergétique différents de ceux proposés par la trajectoire LTECV. Enfin, dans une dernière partie, nous comparons les situations françaises et suédoises en matière de politique énergétique et de trajectoires d'évolution du système énergétique afin de souligner le poids joué par les conditions initiales dans la réalisation de l'objectif de neutralité carbone. La Suède a en effet de nombreux points communs avec la France concernant son système énergétique et a, ces dernières années, fortement diminué ses émissions de GES tout en assurant une croissance économique forte. Nous montrerons ce que la France pourrait apprendre de l'exemple suédois pour mener à bien une transition énergétique bas-carbone.

#### 4.1 LE CONTRÔLE PAR LA TAXE CARBONE

La taxe carbone est l'outil prôné par beaucoup d'économistes comme Nordhaus, Tol, Tirole ou encore Gollier pour diminuer les émissions CO<sub>2</sub><sup>1</sup>. Dans le cadre standard de l'économie de l'environnement dite néoclassique<sup>2</sup>, la politique environnementale optimale pour une réduction des émissions se traduit en contexte dit concurrentiel par la mise en place d'une taxe pigouvienne (PIGOU, 1920). Cette taxe est fixée au niveau des coûts marginaux des pollueurs ou, autrement dit, au multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte sur la pollution<sup>3</sup>. La taxe a ainsi pour vocation d'internaliser le coût des externalités produites par les émissions CO<sub>2</sub>. En faisant certaines hypothèses classiques en économie (maximisation de l'utilité, agent rationnel, contexte concurrentiel)<sup>4</sup>, il ressort en effet que la taxe carbone unique au niveau mondial est le moyen le plus efficace pour diminuer les émissions CO<sub>2</sub> (CRAMTON, OCKENFELS et TIROLE, 2017). D'autres instruments économiques comme le marché de permis d'émissions (COASE, 1960) ou réglementaires avec l'instauration de normes<sup>5</sup> peuvent également être mis en place. De nombreux travaux notamment initiés par BAUMOL (1972) et WEITZMAN (1974) se sont penchés sur les avantages comparés

1. Voir par exemple TIROLE et GOLLIER (2015).

2. Voir par exemple TOL (2014).

3. La définition de la taxe pigouvienne est basée sur une approche coût-efficacité (ou *cost effectiveness*) dans le cadre statique.

4. Ces hypothèses s'éloignant de la réalité peuvent être critiquées.

5. Une norme définit un seuil maximal.

d'une norme ou d'une taxe mais c'est ce dernier instrument qui reste principalement mis en avant par les économistes.

La solution de la taxe carbone est ainsi soutenue à un niveau international. Malgré les critiques, beaucoup d'économistes continuent de prôner l'instauration de la taxe carbone unique comme moyen d'atteindre les objectifs fixés par l'accord de Paris (WEITZMAN, 2014; ALDY et al., 2016). Le plus réaliste étant que chaque pays adopte son prix du carbone, des propositions de regrouper plusieurs pays en club ont émergé (NORDHAUS, 2015). Ce club partagerait le même niveau de taxe carbone mais les difficultés de mise en place ne sont pas élucidées. Récemment, le rapport de la Commission de haut niveau sur les prix du carbone (STIGLITZ et al., 2017) a ainsi estimé que pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, il était nécessaire de mettre en place un signal-prix minimum de 40 à 80 \$/tCO<sub>2</sub> en 2020 et de 50 à 100 \$/tCO<sub>2</sub> en 2050. La Commission précise que ce niveau de tarification est soumis à des conditions de politiques d'accompagnement favorables (investissement dans des infrastructures publiques de transport, réglementation sur l'efficacité énergétique, soutien à l'innovation, etc.). L'efficacité d'une taxe unique au niveau mondial est toutefois fortement remise en question. Ainsi, pour BOYCE (2018), la mise en œuvre d'une taxe carbone unique doit résoudre deux problèmes d'équité, celui au sein d'un pays mais également entre des pays très différents en matière de richesse économique. Pour TVINNEREIM et MEHLING (2018), atteindre des objectifs ambitieux en reposant uniquement sur une taxe carbone paraît difficile. Enfin, le contrôle de la transition exclusivement via des instruments économiques a également conduit au développement d'autres instruments de marché comme le marché carbone européen ou les mécanismes de développement propre qui sont sujets à de nombreuses critiques, dont leur manque d'efficacité (POTTIER, 2014).

Pour déterminer le niveau d'une taxe carbone, deux approches sont possibles, l'analyse coût/efficacité et l'analyse coût/bénéfice, et peuvent mener à des évaluations différentes (HOURCADE, POTTIER et ESPAGNE, 2018). L'analyse coût/bénéfice est utilisée notamment par Nordhaus dans son modèle DICE (NORDHAUS, 1993) ou par Stern dans son rapport éponyme (STERN, 2006). Dans cette approche, des IAM (*Integrated Assessment Model*) permettent de calculer le coût social du carbone en maximisant la valeur actualisée des bénéfices d'une réduction des émissions de GES tout en prenant en compte le coût associé à cette réduction. Cette méthode est toutefois sujette à de nombreuses critiques car les hypothèses concernant la forme de la courbe des dommages, le choix du taux d'actualisation, les risques et les impacts de la pollution ont une grande influence sur le résultat alors que les incertitudes sont importantes (BOYCE, 2018). Les autres hypothèses nécessaires pour garantir l'efficacité d'une taxe carbone peuvent également être remises en question : marché parfait, circulation de

l'information, etc. Pour POTTIER (2016), « l'analyse coût/bénéfice n'a pas réussi à éteindre les contestations : au contraire, elle a obscurci les véritables conflits en les transformant en simples controverses techniques ».

Nous proposons dans ce qui suit d'explorer le statut de la taxe carbone en France via une approche coût-efficacité. La cible de réduction est alors définie et la taxe correspond au coût marginal d'abattement des émissions. Grâce à l'utilisation du modèle de prospective TIMES-France, nous allons évaluer à quel niveau la taxe carbone devrait être fixée pour atteindre un objectif ambitieux de neutralité carbone.

#### 4.1.1 *Déclinaison française de la taxe carbone*

L'État a souvent eu des difficultés à mettre en place des instruments économiques comme en témoignent les atermoiements autour de l'écotaxe routière qui a finalement été abandonnée après un épisode de contestation sociale vigoureuse en 2014. Parmi les instruments économiques mis en place, le bonus malus sur l'achat de nouveaux véhicules a permis de réduire la vente de voitures diesel mais n'empêche pas pour l'instant l'augmentation des ventes de véhicules tout-terrain (SUV), très polluants et émetteurs de CO<sub>2</sub> (ADEME, 2019b). Selon une note de France Stratégie (MEILHAN, 2019), les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des voitures neuves mesurées en conditions réelles de conduite n'ont pas baissé depuis une dizaine d'années en Europe. Dans le résidentiel, les crédits d'impôts et les prêts dans l'habitat, bien que très nombreux, ne suffisent pas à l'atteinte des objectifs de réduction de consommation d'énergie du secteur (GIRAUDET, GUIVARCH et QUIRION, 2011; GIRAUDET, GUIVARCH, QUIRION et PENOT-ANTONIOU, 2011).

En France, l'introduction d'une taxe sur le carbone était en discussion depuis la fin des années 1990. Les premières tentatives en 2000 et 2009 dans le cadre des projets de loi de finances (PLF)<sup>6</sup> sont toutes deux rejetées par le Conseil constitutionnel qui estime que la taxe générerait trop d'exemptions enfreignant le principe d'égalité. Finalement, une taxe carbone sur les énergies fossiles<sup>7</sup> est introduite en 2014 au niveau de 7 €/tCO<sub>2</sub> dans la LTECV avec pour objectif une augmentation progressive jusqu'à atteindre 100 €/tCO<sub>2</sub> en 2030 conformément aux recommandations du rapport QUINET (2009). Celui-ci présente

---

6. La première tentative d'introduction se fait dans le cadre du Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) en 2000 et la deuxième se fait à la suite du Grenelle dans le volet climat-énergie de la TGAP (Taxe générale sur les activités polluantes).

7. La taxe carbone est définie comme une composante carbone des différentes taxes sur l'énergie (charbon, essence, gazole, fioul et gaz naturel). Elle vise l'ensemble des particuliers et les entreprises. Toutefois, de nombreux secteurs bénéficient d'exemptions comme le transport routier de marchandises, le transport en commun, les transports aériens et fluviaux, les taxis, les usages agricoles, etc. (ROGISSART, POSTIC et GRIMAUULT, 2018).

la trajectoire d'évolution de la valeur tutélaire du carbone jusqu'en 2050 visant à réduire les émissions de GES de 75 % par rapport à 1990. La valeur tutélaire du carbone sert à évaluer la rentabilité des investissements publics et peut se traduire par un ensemble d'instruments de politiques publiques (réglementation, normes, etc.) et pas obligatoirement par une taxe. Toutefois, celle-ci est l'instrument qui a été privilégié. Basée sur une mise à jour d'un travail effectué en 2001 (BOITEUX, 2001), l'évaluation de la valeur tutélaire s'est appuyée sur la règle de Hotelling ainsi que sur des modèles macro-économiques et des modèles de simulation du système énergétique français. Un nouveau rapport QUINET et al. (2019), auquel nous avons contribué, présente une nouvelle évolution de la valeur tutélaire du carbone afin d'atteindre la neutralité carbone en révisant ses recommandations à la hausse.

Bien que la valeur de la taxe carbone pour 2030 soit inscrite dans la LTECV, elle doit être adoptée chaque année dans le projet de loi de finances (PLF) ce qui engendre des incertitudes sur le niveau réellement adopté. Avec le PLF de 2018, une accélération de la hausse de la taxe carbone a été adoptée : au lieu de 39 €/tCO<sub>2</sub> en 2018, sa valeur est passée à 44,6 €/tCO<sub>2</sub>. Cependant, avec la forte contestation du mouvement des Gilets Jaunes à la fin de l'année 2018, le PLF de 2019 a marqué un arrêt de cette augmentation. La valeur de la taxe carbone en 2019 est restée similaire à celle de 2018. L'évolution de la taxe carbone est donc soumise à de fortes incertitudes et peut être facilement remise en cause. Son introduction étant plutôt récente, ses effets sur le système énergétique sont difficiles à évaluer (GLORANT, 2018). Les émissions CO<sub>2</sub> ont ainsi augmenté de 3 % entre 2014 et 2017 avant de baisser en 2018 (-2 % en 2018 par rapport à 2014) grâce, notamment, à un hiver doux et une bonne disponibilité des centrales nucléaires. Cette réduction n'est toutefois pas suffisante pour redresser la trajectoire française vers ses objectifs de diminutions d'émissions CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.2 Les résultats de la commission Quinet 2019

Dans le cadre de la commission Quinet, le modèle TIMES-France a été utilisé pour évaluer la valeur tutélaire du carbone (QUINET et al., 2019). Cette commission placée sous la présidence d'Alain Quinet a réuni avec l'appui de France Stratégie<sup>8</sup> de nombreuses parties prenantes (fonctionnaires de différentes administrations de l'État, représentants d'entreprises, d'ONG, d'associations, etc.) ainsi que des modélisateurs du système énergétique pour faire émerger une proposition consensuelle sur la valeur tutélaire du carbone. Différents types de modèles ont été utilisés : des modèles macro-économiques secto-

---

8. Institution rattachée auprès du Premier Ministre, elle est chargée de réaliser des études d'évaluation des politiques publiques, de prospective, et d'émettre des recommandations dans les différents champs d'action de la politique publique.

riels dont IMACLIM-R France, ThreeME et NEMESIS et des modèles technico-économiques dont POLES et TIMES-France.

#### *Détermination du coût marginal du CO<sub>2</sub>*

Le modèle TIMES-France représente uniquement les émissions CO<sub>2</sub> générées par la combustion d'énergies associées au fonctionnement du système énergétique. Celles-ci représentent toutefois la majeure partie des émissions de GES dues à la combustion d'énergies, près de 98 % en 2014, ce qui constitue donc une approximation suffisante pour réfléchir aux enjeux de la décarbonation du système énergétique. Pour estimer le coût associé à une contrainte de réduction des émissions, la formulation optimale de TIMES est complétée par une contrainte sur les volumes d'émissions CO<sub>2</sub> du système énergétique. Cette contrainte est définie sous forme de trajectoire d'évolution avec des points de passage qui ont été fournis par France Stratégie et que nous détaillerons plus loin<sup>9</sup>.

À la solution optimale (primale) du problème d'optimisation est associée la valeur duale de la contrainte. Cette valeur duale correspond au coût marginal du CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire l'impact induit sur le coût total actualisé si on augmentait la valeur de la contrainte d'une unité. Dans le cas présent, il s'agit donc d'un coût supplémentaire. Ce coût marginal ou valeur duale indique donc le surcoût que la contrainte de décarbonation induit sur le système énergétique à la marge. Il correspond au niveau de la taxe carbone qu'il faudrait appliquer pour arriver au niveau prévu de réduction des émissions.

Le coût marginal du CO<sub>2</sub> ne correspond pas à une *MAC curve*<sup>10</sup> qui donne cette information pour une année particulière. Avec TIMES, les interactions entre les secteurs et avec le long terme sont pris en compte, il y a implicitement derrière ce coût marginal une courbe dynamique et non pas statique comme pour la *MAC curve*.

#### *Hypothèses de l'exercice prospectif*

Un exercice de prospective avec TIMES-France étant intrinsèquement lié aux hypothèses utilisées, nous renvoyons le lecteur à l'[Annexe B](#) pour la présentation exhaustive des hypothèses du modèle et nous présenterons dans ce qui suit les hypothèses spécifiques qui ont été fournies par France Stratégie.

L'évolution des demandes de service énergétique ([Tableau 4.1](#)) suit celle des valeurs ajoutées sectorielles ou des surfaces fournies par le

---

9. La contrainte n'est donc pas exprimée sous forme de budget carbone. Dans ce cas, le modèle aurait en effet le choix de la trajectoire d'évolution des émissions entre aujourd'hui et 2050, c'est-à-dire qu'elle ne passerait pas par les points de passage tels qu'ils ont été spécifiés.

10. *Marginal abatement cost curve*. Une courbe marginale d'abattement est un graphique qui indique le coût marginal de réduction des émissions pour différents potentiels d'abattement des émissions.

modèle macro-économique ThreeME. Cette indexation conduit donc à des niveaux de production et de demandes élevés comparés aux hypothèses qui ont été utilisées par la DGEC pour la construction de leurs scénarios dans le cadre de la SNBC. La demande est fixée de façon exogène et il n’y a pas d’élasticité associée.

TABLE 4.1 – Index fournis par ThreeME pour l’évolution des demandes

SECTEUR		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Industrie</b>	Énergo-intensif	100	113	122	131	140	152	164	178
	Non intensif	100	111	121	129	139	150	163	178
<b>Transport</b>	Rail (fret et passagers)	100	106	112	117	122	128	134	141
	Route (passagers)	100	102	104	106	108	111	114	117
	Route (fret)	100	109	116	123	131	141	152	165
	Fluvial	100	114	119	126	134	145	156	169
	Aérien	100	109	115	120	127	134	142	151
<b>Résidentiel</b>	Surface	100	103	107	111	115	119	123	127
<b>Tertiaire</b>	Privé surface	100	111	120	129	139	151	164	178
	Public surface	100	108	117	126	137	148	160	174
<b>Agriculture</b>		100	108	115	122	129	138	147	158

Les hypothèses d’évolution des prix des énergies fossiles (Tableau 4.2) ont été tirées des scénarios *New Policies* (NP) ou *Sustainable Development* (SD) du WEO 2017 de l’AIE (2017). Le scénario NP correspond à des hypothèses reflétant les engagements pris par les pays concernant leur politique énergétique comme ceux définis dans les contributions déterminées au niveau national (NDC). Le scénario SD reflète des hypothèses plus ambitieuses qui permettent de limiter le réchauffement climatique à 2°C. Par ailleurs, toutes les taxes s’appliquant sur les énergies fossiles ont été supprimées pour que l’estimation de la valeur tutélaire du carbone ne soit pas influencée par celles-ci.

TABLE 4.2 – Évolution des prix des énergies fossiles

SCÉN.	ÉNERGIE	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
SD	pétrole brut (\$2016/baril)	41	66	72	69	66	64	64	64
	gaz naturel (\$2016/MBtu)	4,9	6,1	7	7,4	7,7	7,9	7,9	7,9
	charbon UE (\$2016/t)	63	70	67	64	64	64	64	64
NP	pétrole brut (\$2016/baril)	41	72	88	101	108	116	116	116
	gaz naturel (\$2016/MBtu)	4,9	6,6	7,9	8,6	9,1	9,6	9,6	9,6
	charbon UE (\$2016/t)	63	73	77	80	81	82	82	82

Les gisements disponibles des énergies renouvelables sont présentés dans le Tableau 4.3 pour la biomasse et le Tableau 4.4 pour les EnR électriques. Concernant le nucléaire, la prolongation des centrales existantes n’est pas possible mais de nouvelles centrales peuvent être

construites à partir de 2025 dans la limite d'un **EPR** par an. À partir de 2035, il est possible de construire au maximum 2 **EPR** par an.

TABLE 4.3 – Potentiel de biomasse en 2050

TYPE	POTENTIEL (MTEP)
Imports de biocarburants	3,0
Biogaz	11,6
Biocarburants	5,4
Déchets municipaux	1,0
Déchets industriels	0,4
Produits bois	17,1

TABLE 4.4 – Potentiel des **EnR** électriques

TYPE	CAPACITÉ (GW)
Hydraulique	3,2
Photovoltaïque	400
Énergies marines	3,5
Éolien terrestre	145
Éolien offshore	16,3

Concernant la capture et séquestration du carbone (**CCS**), le potentiel de séquestration est fixé à 20 Mt et est accessible à partir de 2025 (date de maturité des technologies). Sur ce potentiel, le volume de CO<sub>2</sub> qui peut être capté dans le secteur de l'industrie s'élève à 6,5 MtCO<sub>2</sub>. En plus des technologies **CCS** spécifiques décrites dans le modèle dans certains secteurs particuliers (comme la sidérurgie, le ciment, etc. voir [Annexe B](#) pour plus de détail), on considère qu'il est possible d'ajouter dans l'industrie une technologie équivalente au **CCS** au coût de 225 €/tCO<sub>2</sub>, ce qui permet de représenter la possibilité d'accéder à cette technologie pour les secteurs où il n'y a pas de représentation explicite du **CCS**.

Plusieurs contraintes sur les émissions ont été considérées ([Figure 4.1](#)). Leur périmètre se limite aux émissions nationales, provenant de la combustion des énergies, et ne prend pas en compte les émissions liées aux secteurs internationaux de l'aviation et du maritime. Toutes les trajectoires d'émissions CO<sub>2</sub> ont un point de passage en 2030 correspondant à une réduction de 43 % par rapport à 1990 ce qui correspond à la traduction pour les émissions CO<sub>2</sub> de l'engagement de la **LTECV** de réduire de 40 % les émissions de **GES**. En 2050, l'objectif choisi est d'atteindre la neutralité carbone pour respecter les engagements du Plan Climat (MTES, 2017). Cinq variantes ont été considérées, numérotées de V0 à V4. La variation entre ces contraintes

correspond à la disponibilité de puits de CO<sub>2</sub> supplémentaires (forestier par exemple) qui permettrait de relâcher la contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> provenant de la combustion des énergies. La contrainte la plus stricte V0 (neutralité) correspond à un objectif de -9 MtCO<sub>2</sub> (soit une réduction de 102 % pour les émissions CO<sub>2</sub> par rapport à 1990) et la plus optimiste V4 avec une marge de 40 MtCO<sub>2</sub> correspond à un objectif de 31 MtCO<sub>2</sub> (soit une réduction de 92 % pour les émissions CO<sub>2</sub>).

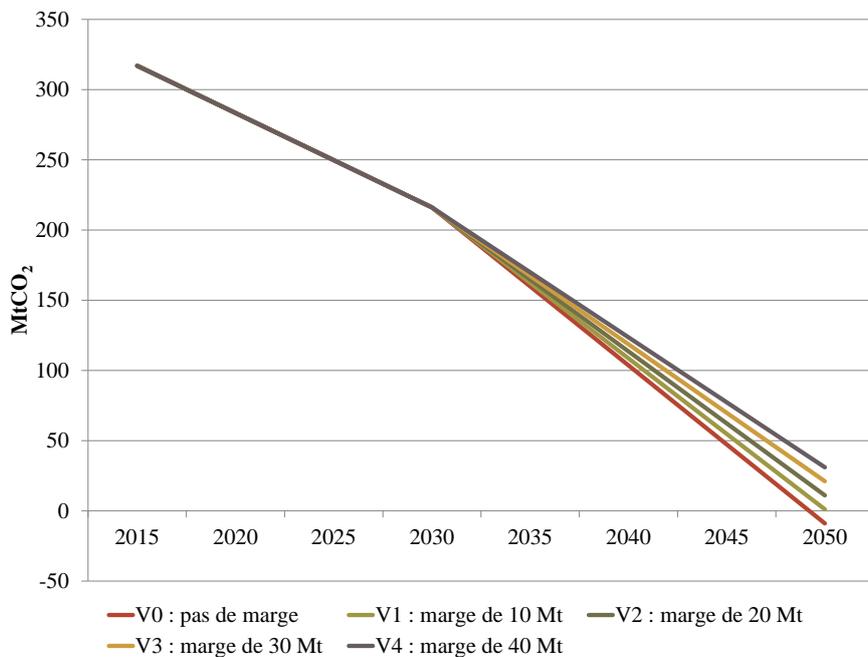


FIGURE 4.1 – Contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub>

#### Résultats du modèle TIMES-France

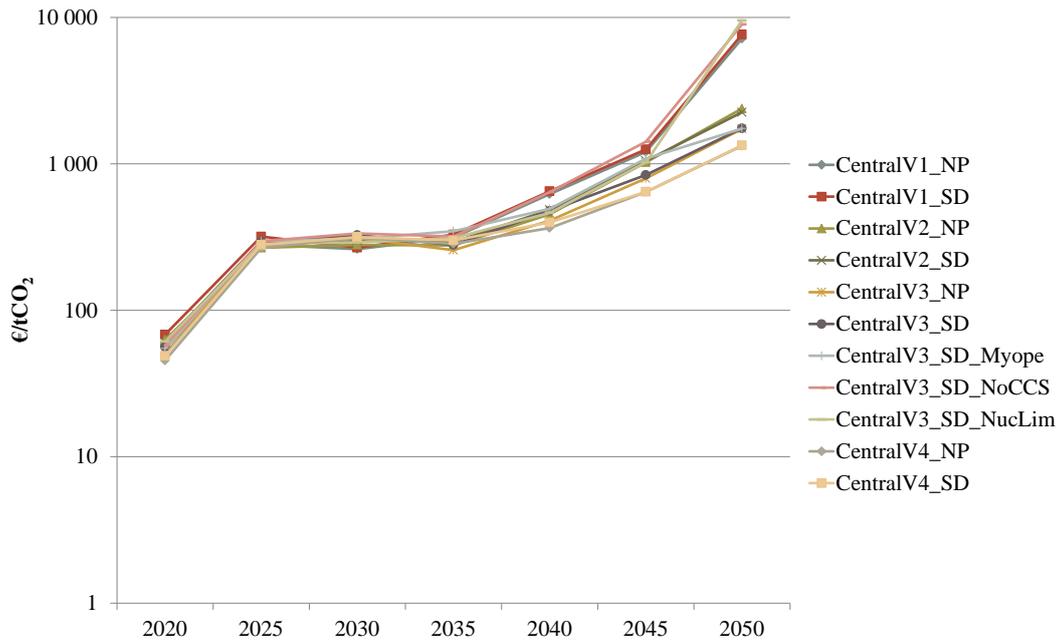
L'ensemble des scénarios réalisés est présenté dans le [Tableau 4.5](#) avec les hypothèses utilisées. Des résultats complémentaires sont présentés en [Annexe E](#).

Les évolutions du coût marginal du CO<sub>2</sub> pour les différents scénarios sont présentées dans la [Figure 4.2](#). Pour les scénarios CentralV0-SD, CentralV0-NP, et CentralV3-SD\_NuCLim\_NoCCS, le modèle doit faire appel à des importations virtuelles pour respecter toutes les contraintes qui lui ont été imposées. Cela signifie que les résultats associés ne sont pas pertinents et ne seront donc pas présentés. Ces scénarios n'arrivent pas à atteindre la neutralité carbone quel que soit le bouquet technologique envisagé.

On constate que l'augmentation entre 2020 et 2025 du coût marginal est très forte et s'explique par l'investissement dans des centrales

TABLE 4.5 – Scénarios produits pour la commission Quinet

NOM DU SCÉNARIO	CONTRAINTE EMISSION	TRAJECTOIRE DE PRIX	CCS	LIMITATION NUCLÉAIRE
Ref_SD		SD du WEO		
Ref_NP		NP du WEO		
CentralV0_SD	V0 : neutralité	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV0_NP	V0 : neutralité	NP du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV1_SD	V1 : avec marge de 10 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV1_NP	V1 : avec marge de 10 MtCO <sub>2</sub>	NP du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV2_SD	V2 : avec marge de 20 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV2_NP	V2 : avec marge de 20 MtCO <sub>2</sub>	NP du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV3_SD	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV3_NP	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	NP du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV4_SD	V4 : avec marge de 40 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV4_NP	V4 : avec marge de 40 MtCO <sub>2</sub>	NP du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	
CentralV3_SD_NucLim	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	Capacité totale ≤ 63,2 GW
CentralV3_SD_NucLim_NoCCS	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Pas de CCS	Capacité totale ≤ 63,2 GW
CentralV3_SD_NoCCS	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Pas de CCS	
CentralV3_SD_Myope	V3 : avec marge de 30 MtCO <sub>2</sub>	SD du WEO	Limité à 20 MtCO <sub>2</sub>	

FIGURE 4.2 – Coût marginal du CO<sub>2</sub>

nucléaires<sup>11</sup>. En effet, avec les hypothèses utilisées, il n'est pas possible de prolonger la durée de vie des centrales existantes. Entre 2020 et 2025, les capacités de ces centrales baissent fortement (effet falaise) et le modèle choisit d'investir dans de nouvelles centrales nucléaires. Les investissements réalisés en 2025 permettent par la suite, jusqu'en 2035, de maintenir un niveau similaire de coût marginal du CO<sub>2</sub>.

Les trajectoires de coût marginal commencent à se différencier à partir de 2035 (ce qui correspond à une réduction des émissions comprise entre -55 % et -58 % par rapport à 1990). En 2050, dans tous les scénarios, le coût marginal du CO<sub>2</sub> est supérieur à 1 000 €/tCO<sub>2</sub>. Plus la contrainte est forte, plus le coût marginal du CO<sub>2</sub> est important avec une augmentation exponentielle pour les dernières tonnes à réduire. L'augmentation du coût marginal est de 4 774 € en 2050 entre la contrainte V2 et V1 (voir [Tableau 4.7](#)) mais de 404 € entre la V4 et la V3. Les dernières tonnes sont donc particulièrement coûteuses à abattre ce qui s'explique en partie par la rigidité de la représentation du système énergétique pour les émissions résiduelles. Certaines technologies dans certains secteurs comme l'agriculture, l'industrie, la branche « autres » du tertiaire ou le transport (aviation et maritime) n'ont pas de possibilité de substitutions vers des technologies décarbonées. Il reste donc un reliquat d'émissions d'environ 19 MtCO<sub>2</sub> qui doit être compensé par des émissions négatives. Tous les scénarios ont

11. La limitation du nucléaire dans scénario NuCLim s'élève à 63,2 GW, c'est-à-dire les capacités actuelles. Il y a donc également dans ce scénario un investissement dans de nouvelles centrales nucléaires.

d'ailleurs besoin d'émissions négatives pour atteindre l'objectif fixé comme on peut le voir sur la [Figure 4.3](#).

TABLE 4.7 – Valeurs du coût marginal pour les scénarios NP

€/tCO <sub>2</sub>	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CentralV1_NP	50	281	262	313	621	1205	7157
CentralV2_NP	63	267	280	277	452	1024	2383
CentralV3_NP	54	270	312	257	409	796	1731
CentralV4_NP	45	266	313	284	364	642	1327

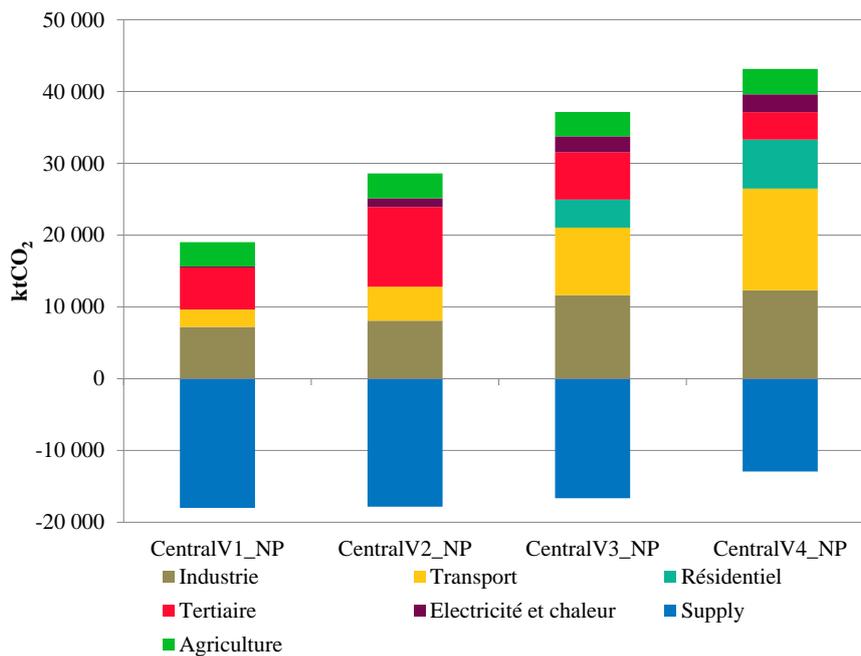


FIGURE 4.3 – Émissions résiduelles en 2050

Le secteur *Supply* correspond au secteur de l'avitaillement, il comprend notamment les raffineries et la transformation de biogaz en biométhane.

L'influence des prix des énergies fossiles sur le niveau du coût marginal du CO<sub>2</sub> est très faible. L'impact est de quelques € les premières années et s'élève à quelques dizaines d'€ en 2050. Les premières périodes, les prix sont assez similaires entre les deux trajectoires. Plus on se rapproche de 2050, plus la part d'énergies fossiles dans le système énergétique se réduit et leur influence sur le coût marginal du CO<sub>2</sub> devient limitée. On notera toutefois que les surcoûts des scénarios NP par rapport au Ref\_NP (valeur totale actualisée) sont inférieurs à ceux des scénarios SD par rapport au Ref\_SD (voir [Tableau 4.8](#)).

La disponibilité des technologies joue également un rôle important. Ainsi, si les options CCS et nouvelles centrales nucléaires ne sont pas disponibles, la contrainte de neutralité carbone est trop forte

TABLE 4.8 – Surcoût des scénarios par rapport à un scénario de référence (NP ou SD)

SCÉNARIO	SURCOÛT
CentralV1_NP	9 %
CentralV1_SD	11 %
CentralV2_NP	8 %
CentralV2_SD	10 %
CentralV3_NP	7 %
CentralV3_SD	9 %
CentralV3_SD_Myope	9 %
CentralV3_SD_NoCCS	11 %
CentralV3_SD_NucLim	10 %
CentralV4_NP	7 %
CentralV4_SD	8 %

et ne peut pas être satisfaite. Lorsqu'on limite la construction de centrales nucléaires, la différence est surtout visible les dernières années de l'horizon avec une diminution de la production d'électricité. Lorsqu'il n'est pas possible de recourir à la séquestration du carbone, la production de dihydrogène augmente pour décarboner l'énergie consommée au lieu de recourir à des émissions négatives. Dans les deux cas, la limitation de la disponibilité de ces options augmente fortement le coût marginal du CO<sub>2</sub> (voir [Tableau 4.9](#)). De manière générale, plus la contrainte est forte en 2050, plus la production de dihydrogène augmente puisque le recours aux émissions négatives est limité.

TABLE 4.9 – Coût marginal du CO<sub>2</sub> pour des variantes sur la disponibilité des technologies

SCÉNARIO	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CentralV3_SD	56	292	326	279	477	839	1747
CentralV3_SD_NoCCS	57	296	335	319	641	1416	8955
CentralV3_SD_NucLim	61	284	291	311	462	1023	9510

Enfin, le niveau des investissements supplémentaires par rapport à un scénario de référence ([Figure 4.4](#)) augmente avec le temps. Ceux-ci sont particulièrement importants dans le secteur du transport. Les investissements dans le secteur du résidentiel font plus que doubler entre 2045 et 2050 car le déploiement de systèmes pour décarboner ce secteur est très coûteux (notamment les pompes à chaleur électriques et les technologies d'isolation).

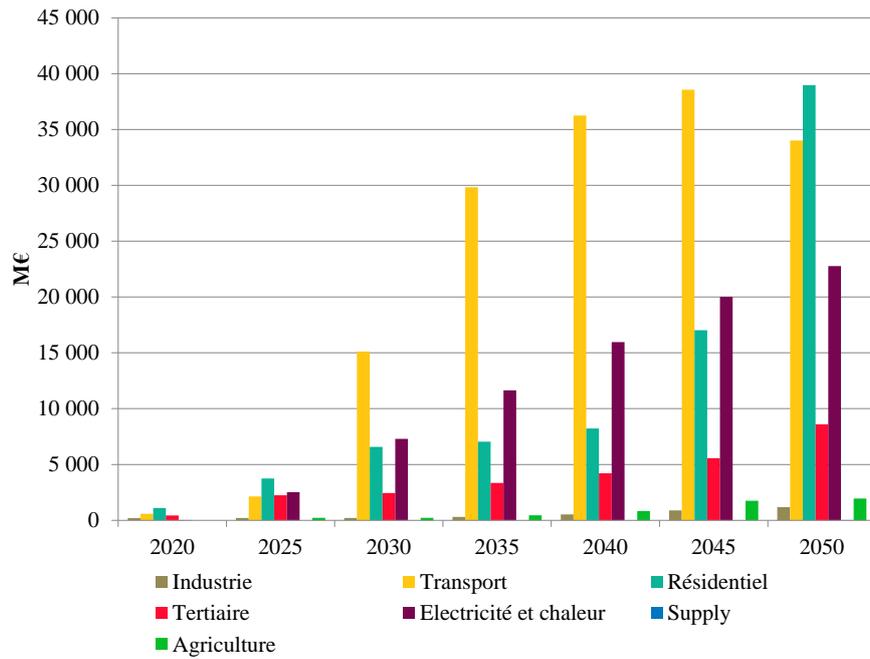


FIGURE 4.4 – Investissement supplémentaire par secteur dans CentralV3\_SD par rapport à Ref\_SD

#### 4.1.3 Une taxe carbone difficile à mettre en œuvre

Le niveau d'une taxe carbone à appliquer en France pour atteindre la neutralité carbone est très élevé, même en considérant des potentiels supplémentaires liés à une plus grande disponibilité des puits. Avec le modèle TIMES-France, on obtient des niveaux de taxe supérieurs à 1 000 €/tCO<sub>2</sub>. Cette évaluation est évidemment sujette à des incertitudes, dues à l'évolution des coûts des technologies et du prix des énergies fossiles mais également à l'évolution des demandes de service énergétique. En effet, dans les scénarios que nous avons proposés, les demandes sont particulièrement élevées, en particulier si on les compare au niveau des demandes utilisées pour les scénarios sous-jacents à la SNBC<sup>12</sup> (voir section 4.2). On notera cependant que même dans les scénarios avec une demande plus faible, le niveau de la taxe reste supérieur à 1 000 €/tCO<sub>2</sub>.

L'évaluation de la valeur duale menée avec le modèle TIMES-France présente certaines limites. Le modèle n'apporte qu'une image partielle de la réalité car sa formulation fait l'hypothèse d'un planificateur bienveillant et omniscient. En outre, la représentation des infrastructures y est limitée (lignes de transport d'électricité, infrastructures de transport, etc.). Ces deux éléments, s'ils étaient pris en compte, auraient a priori plutôt tendance à augmenter encore le coût de la taxe

12. Les exercices ont été menés avec des administrations différentes. Le choix de France Stratégie a été de favoriser une certaine cohérence entre les modèles d'où le calibrage des demandes suivant les sorties du modèle ThreeME.

carbone. Par contre, en faisant des hypothèses sur une évolution des demandes plus basses associées par exemple à des changements de mode de vie, la valeur serait revue à la baisse (MILLOT et al., 2018).

Pour favoriser la mise en œuvre d'une taxe carbone, les économistes mettent souvent en avant le phénomène de double dividende (PEARCE, 1991 ; GOULDER, 1995). En effet, un recyclage des revenus de la taxe carbone apporte des bénéfices supplémentaires en diminuant par exemple le poids d'autres taxes ayant des effets distorsifs : il y a un dividende environnemental grâce à la réduction des émissions ou de la pollution mais également un dividende économique grâce aux gains d'efficacité qui peuvent se traduire par une amélioration de la croissance économique, de la compétitivité, de l'emploi ou des innovations technologiques. Ce deuxième dividende dépend de la politique mise en place pour recycler les revenus fiscaux (BARANZINI, GOLDEMBERG et SPECK, 2000) puisque la redistribution du revenu de la taxe peut se faire soit via un allègement d'autres taxes pesant sur les entreprises ou le travail, soit via des subventions pour les ménages les plus pauvres ou pour l'investissement dans de nouvelles technologies.

Pour améliorer l'acceptabilité sociale d'une taxe carbone et contribuer à son succès, KLENERT et al. (2018) soulignent le rôle important du choix de recyclage du revenu de la taxe carbone qui dépend lui-même du contexte politique et économique propre à chaque pays, comme l'a récemment rappelé en France la crise des Gilets Jaunes. La répercussion d'une taxe carbone sur le prix des carburants et du gaz naturel en France est présentée dans le [Tableau 4.10](#). Même avec une taxe à 50 €/tCO<sub>2</sub>, les prix s'élèvent considérablement ce qui souligne bien les enjeux liés à l'appropriation de cet instrument. La taxe carbone pèse ainsi fortement sur le budget des populations à bas revenu comparativement à celui des plus aisés (CAYLA, 2011). Les valeurs de taxe requises pour arriver à des niveaux importants de réduction des émissions engendrent donc des contraintes sur la politique économique qui rendent la faisabilité de cette taxe complexe. L'équité de la politique publique mise en place doit ainsi être soigneusement étudiée pour favoriser son acceptation. La problématique de l'équité ne se pose pas seulement au sein d'un pays, mais également entre les pays développés et les pays en voie de développement. Selon CRASSOUS (2008), « sans transferts, l'instauration d'un prix uniforme du carbone ne serait pas seulement sous optimale, elle serait aussi politiquement inacceptable parce qu'elle comporte des risques macroéconomiques trop élevés ». Pour les pays les plus pauvres, l'impact d'une politique climatique est encore plus coûteux que pour les pays les plus riches et doit être limité par des flux financiers provenant des pays développés. Malgré les promesses d'aide financière accordées durant les négociations internationales, leur concrétisation n'est pas garantie et les flux actuels ne touchent pas les plus vulnérables (MATTAR, KANSUK et JAFRY, 2019).

TABLE 4.10 – Impact d’une taxe sur des produits énergétiques d’origine fossile

	GAZOLE (€/L)	ESSENCE SP95 (€/L)	GAZ NATUREL (€/MWhPCS)
Coût HTT	0,55	0,55	35
Impact d’une taxe carbone (€/tCO <sub>2</sub> )	50	0,67	0,77
	100	1,33	1,53
	500	6,66	7,66
	750	9,99	11,48
	1000	13,32	15,31

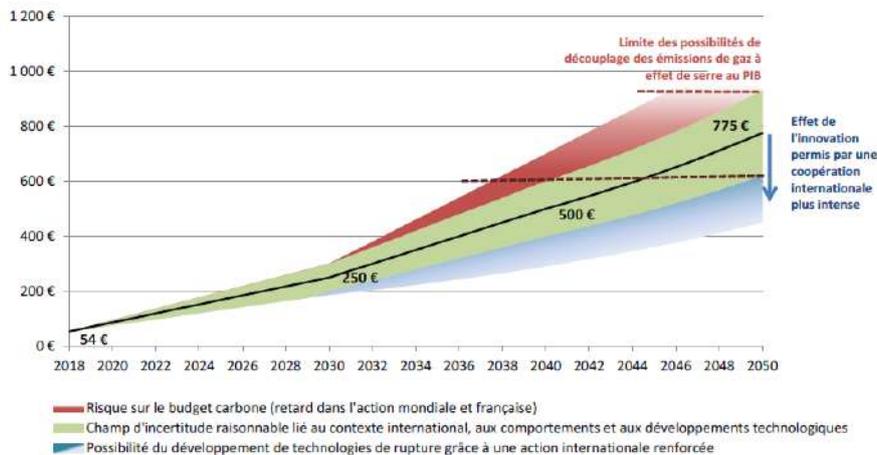
La taxe ne peut être efficace pour atteindre des objectifs ambitieux que si des mécanismes de transfert et de redistribution non distortifs sont mis en place. Dans la mesure où il n’existe pas de stratégie uniforme pour la politique de recyclage, le travail de communication et de dialogue auprès des citoyens est primordial pour qu’ils comprennent les aboutissants de la taxe carbone et se l’approprient. Selon TVINNEREIM et MEHLING (2018), la taxe carbone doit être complémentaire d’autres instruments de politiques publiques économiques et réglementaires pour que le public l’accepte plus facilement. L’efficacité économique ne doit donc pas être l’unique critère retenu pour l’élaboration des politiques publiques.

Au-delà des difficultés de sa mise en œuvre, la taxe carbone est également critiquée pour son manque d’efficacité dans l’atteinte d’objectifs ambitieux de réduction des émissions (TVINNEREIM et MEHLING, 2018). Les différentes déclinaisons nationales de systèmes de taxation du carbone semblent montrer qu’un système dit de *cap and trade* (marché où s’échange une quantité donnée de droit à polluer) peut être plus efficace que prévu (TVINNEREIM, 2014). Cependant, même si le marché européen (ETS) a entraîné des réductions d’émissions par rapport à des scénarios de référence ou *business as usual*, il n’a pas permis d’éviter la construction de nouvelles centrales thermiques dans le secteur de l’électricité, alors que de tels investissements doivent être évités pour pouvoir respecter les engagements internationaux. Un système de taxation peut ainsi parfois générer des situations de *carbon lock-in*. La taxe carbone n’a pas non plus démontré son efficacité pour déclencher des investissements dans la recherche et l’innovation, par exemple pour favoriser le déploiement des véhicules électriques (TVINNEREIM et MEHLING, 2018). Finalement, elle semble avoir un effet en présence de moyens facilement substituables. En Suède, par exemple, la taxe carbone a facilité le passage du charbon vers la biomasse dans les réseaux de chaleur. Par contre, dans le secteur du transport, elle n’a

pas déclenché de décarbonation malgré son application depuis plus de 20 ans et une valeur supérieur à 100 €/tCO<sub>2</sub> depuis 2008. Un niveau très élevé de taxe n'est donc pas forcément suffisant pour atteindre des réductions d'émissions importantes.

Même si les modèles ont évalué la valeur du carbone en l'assimilant à une taxe sur les émissions CO<sub>2</sub>, la commission Quinet précise que la valeur tutélaire du carbone n'a pas vocation à être utilisée en tant que taxe et s'éloigne d'ailleurs significativement des résultats des différents modèles. Si l'on revient à la notion de valeur tutélaire du carbone, il est utile de préciser son rôle. Pour l'administration, elle doit servir de référence pour l'évaluation socio-économique des investissements publics et pour guider l'action dans les politiques publiques à mener. En particulier, il est précisé qu'il faudra mettre en place « une combinaison pertinente de mesures publiques [...] pour faire levier de manière efficace ». Aussi, dans le rapport QUINET et al. (2019), la trajectoire finalement retenue par l'ensemble des parties prenantes pour la valeur tutélaire du carbone (voir Figure 4.5) est beaucoup plus basse que celle formée par les valeurs calculées par les différents modèles - dont celles de TIMES-France - notamment pour présenter une valeur plus consensuelle et acceptable socialement.

FIGURE 4.5 – Valeur de l'action pour le climat



Source : QUINET et al. (2019)

Appliquer une taxe carbone au niveau requis pour atteindre la neutralité carbone semble s'avérer très difficile voire politiquement et socialement impossible, à moins de redéfinir un nouveau contrat social comme le propose HOURCADE (2015). Même en réduisant le niveau de la taxe, des mesures d'accompagnement doivent être mises en place comme cela est d'ailleurs souligné dans le dernier rapport QUINET et al. (2019). Les récents mouvements de protestation des Gilets Jaunes témoignent de cette difficulté de mise en œuvre d'un tel instrument

économique bien que la taxe ne s'élève « qu'à » 44,6 €/tCO<sub>2</sub> loin des valeurs tutélaires de 100 €/tCO<sub>2</sub> en 2030 du premier rapport Quinet et très loin des 775 €/tCO<sub>2</sub> en 2050 du deuxième rapport Quinet. Ainsi, la valeur pour 2050, trop élevée pour être retenue comme taxe carbone, doit être mise en œuvre via l'adoption de normes ou l'investissement dans des projets permettant la réduction des émissions.

La mise en place d'une taxe carbone doit également se faire de façon crédible. L'introduction de cet outil en Suède (nous y reviendrons dans la [section 4.3](#)) s'est faite progressivement avec une vision à long terme de son évolution, facilitant les investissements des acteurs privés. La crédibilité accordée aux politiques mises en place est donc un élément clé. L'arrêt en France de la hausse de la taxe carbone ouvre ainsi une période d'incertitude aussi bien pour les entreprises que pour les citoyens. Sur le marché carbone européen (ETS), les niveaux très bas autour desquels se sont échangés la tonne de carbone n'a pas permis d'enclencher les investissements nécessaires dans des technologies bas-carbone. Outre la problématique d'accompagnement, il est également vraisemblable qu'appliquer uniquement une taxe ne soit pas suffisant pour atteindre des objectifs importants de décarbonation comme la neutralité carbone (TVINNEREIM et MEHLING, 2018). Il faudra donc recourir à un mix de normes et de signal-prix.

Pour piloter une transition énergétique vers un monde bas-carbone, la communauté des économistes néoclassiques, souvent désignés comme « orthodoxes », recommande majoritairement d'utiliser une taxe carbone. Or, l'usage seul de cet instrument économique ne semble pas adapté pour réaliser ce pilotage. En réalité, la compréhension des changements du système énergétique associés à ces objectifs est nécessaire pour mettre en place un pilotage pertinent de la transition. C'est pourquoi nous allons explorer dans ce qui suit les changements technologiques qu'impliquerait une transition énergétique bas-carbone en France. La faisabilité des objectifs associés à la LTECV ou de celui de neutralité carbone tel qu'envisagé actuellement par le gouvernement doit en effet être évaluée a priori.

#### 4.2 CONFLITS ENTRE TRAJECTOIRE NEUTRALITÉ ET LTECV

Pour réfléchir aux enjeux liés à la transition énergétique bas-carbone, nous souhaitons explorer les changements que celle-ci impliquerait sur le système énergétique en France. L'outil prospectif TIMES-France nous donne ainsi le cadre pour réfléchir aux modifications nécessaires dans l'ensemble des secteurs.

Dans le cadre de l'accord de Paris qui prévoit de limiter l'élévation de la température moyenne mondiale « bien en-dessous de 2°C » et de « poursuivre leurs efforts pour limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C » (article 2), de nombreux pays se sont engagés à atteindre la neutralité carbone, en particulier les pays européens

qui souhaitent faire figure de leaders comme la Suède (DARBY, 2017), la Norvège (NESLEN, 2016), le Portugal (GUGGENHEIM, 2018) ou le Royaume-Uni (EVANS, 2019). Avec la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) promulguée en 2015, la France avait déjà des objectifs ambitieux : la réduction de ses émissions de GES de 75 % en 2050 par rapport à 1990, la réduction de la part du nucléaire dans l'électricité à 50 % de la production en 2025<sup>13</sup> et la réduction de la consommation d'énergie finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012. En 2017, la France a annoncé dans un plan stratégique un nouvel objectif de neutralité carbone en 2050 (MTES, 2017). Cet objectif ne fait pas encore partie d'une législation qui le rendrait contraignant mais une loi entérinant ce nouvel objectif devrait être adoptée cette année (2019).

Jusqu'à présent, les exercices de prospective du système énergétique français étaient conformes à l'objectif de réduction des émissions de GES de 75 % en 2050 par rapport à 1990, à l'instar de l'étude ADEME (2017) ou de l'étude de cas française du DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project) (CRIQUI, MATHY et HOURCADE, 2015). Le seul exercice de prospective qui présente un scénario de transition énergétique pour atteindre la neutralité carbone est celui de NÉGAWATT (2017). Jusqu'à récemment, les exercices de prospective officiels réalisés par le ministère de la Transition écologique et solidaire avaient pour horizon 2035 (BEPM, 2015b). Dans le cadre de la dernière Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) (MTES, 2018), le ministère a prolongé son horizon jusqu'en 2050 et a pris en compte le nouvel objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 (DGEC, 2019). Cet objectif doit être atteint sans utiliser de crédits internationaux (réduction à l'étranger) et prend en compte le transport international (aviation et bunker). Ce dernier exercice semble s'appuyer sur de nombreuses hypothèses optimistes mais le rapport sur les résultats détaillés de ce scénario ainsi que ses hypothèses n'a pas encore été publié<sup>14</sup>. Sur la base des scénarios réalisés par le ministère, des budgets carbone sont établis. Toutefois, le précédent budget carbone issu de la dernière stratégie française pour la réduction des émissions de carbone n'a pas été respecté car les émissions de GES ont dépassé de 72 MtCO<sub>2</sub>eq le budget de 440 MtCO<sub>2</sub>eq (valeurs provisoires) pour la période 2015-2018.

L'objectif de l'analyse prospective que nous allons mener dans cette section est donc d'étudier l'impact d'un objectif de neutralité à l'horizon 2050 sur la trajectoire du système énergétique et de réfléchir à l'adéquation entre les hypothèses actuellement utilisées par le ministère, les principaux objectifs de la LTECV et le nouvel objectif de neutralité carbone. Le modèle TIMES est adapté pour répondre à ces questions car il permet grâce à sa représentation technologique

---

13. L'objectif concernant le nucléaire est pour l'instant reporté à 2035.

14. Le document publié (DGEC, 2019) ne contient qu'une synthèse des hypothèses et des résultats.

détaillée de l'ensemble des secteurs de capturer les interactions et les dynamiques entre secteurs et de proposer une trajectoire optimale pour satisfaire les contraintes qu'on lui impose.

#### 4.2.1 Hypothèses de l'exercice prospectif

Les différents scénarios utilisés pour cette analyse sont présentés dans le [Tableau 4.12](#). Pour la contrainte neutralité carbone, l'objectif de réduction des émissions CO<sub>2</sub> est d'atteindre environ 11 MtCO<sub>2</sub> en 2050. Cette valeur a été choisie en reprenant les calculs effectués dans le cadre des travaux de la commission Quinet, c'est-à-dire en tenant compte des réductions plausibles dans les autres secteurs non représentés dans le système énergétique de référence de TIMES-France (déchets, utilisation non énergétique en agriculture et dans les processus industriels) et en supposant qu'un puits de 75 Mt sera disponible (grâce au secteur [UTCATF](#) ou à un autre moyen). Les scénarios avec une contrainte plus stricte sur les émissions CO<sub>2</sub> sont également analysés avec un objectif négatif de -9 MtCO<sub>2</sub> en 2050, ce qui correspond à une hypothèse plus prudente concernant le puits de 55 Mt. Dans les deux cas, il existe un objectif intermédiaire de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 40 % en 2030, comme indiqué dans la loi. L'ensemble des scénarios respectant une contrainte de neutralité carbone seront désignés par Neutralité. En outre, dans le scénario LTECV, l'objectif concernant les émissions CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 est conforme à celui de la loi, à savoir une réduction des émissions de GES de 75 % en 2050. Cet objectif se traduit pour les émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion des énergies par une réduction de 80 % en 2050.

Par ailleurs, la production nucléaire est limitée (la contrainte est plus forte que dans les scénarios précédents). Dans la plupart des scénarios, la contrainte sur la part nucléaire dans la production d'électricité s'élève à 50 % de 2035 jusqu'à 2050. Dans les scénarios NoNuc, aucune nouvelle capacité nucléaire ne peut être construite. La durée de vie des centrales nucléaires existantes peut être prolongée moyennant un coût d'investissement de 1 200 €/kW pour 20 ans, suivant l'hypothèse prise par RTE ([2017a](#)).

Les niveaux des demandes de service énergétique sont fixés de manière exogène (voir [Tableau 4.14](#), [4.15](#), [4.16](#), [4.17](#), [4.18](#)). Leurs évolutions sont dérivées des hypothèses utilisées pour les scénarios nationaux (BEPM, [2015a](#), et communications personnelles avec le BEPM de la DGEC). Le niveau haut correspond aux demandes utilisées dans le scénario [AME](#), et le niveau bas à celles du scénario [AMS](#).

Pour les technologies de capture et de séquestration du CO<sub>2</sub> (CCS), le potentiel de séquestration disponible est de 40 MtCO<sub>2</sub> par an dans l'option haute et de 20 MtCO<sub>2</sub> dans l'option basse. Le gisement de 40 MtCO<sub>2</sub> correspond à une version optimiste du potentiel de séquestration disponible, c'est la valeur basse retenue par le rapport du

TABLE 4.12 – Scénarios Neutralité et LTECV

NOM	DEMANDE	ÉMISSIONS	CCS	NUCLÉAIRE	FLEX
NeutralityV2_CCsLow	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV2_NoCCS	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Pas de CCS	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV2_NoCCS_Flex	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Pas de CCS	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Oui
NeutralityV2_NoCCS_NoNuc	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Pas de CCS	Pas de nouvelles capacités	Non
NeutralityV2_CCSHigh_NoNuc	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 40 Mt	Pas de nouvelles capacités	Non
NeutralityV2_CCSHigh_NoNuc_Flex	Basse	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 40 Mt	Pas de nouvelles capacités	Oui
NeutralityV0_CCsLow	Basse	V0 : -9 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV0_CCsLow_Flex	Basse	V0 : -9 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Oui
NeutralityV2_CCsLow_Dhigh	Haute	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV2_NoCCS_Dhigh	Haute	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Pas de CCS	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV2_CCSHigh_Dhigh_NoNuc	Haute	V2 : 11 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 40 Mt	Pas de nouvelles capacités	Non
NeutralityV0_CCsLow_Dhigh	Haute	V0 : -9 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
NeutralityV0_CCsLow_Dhigh_Flex	Haute	V0 : -9 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Oui
NeutralityV0_CCSHigh_Dhigh	Haute	V0 : -9 MtCO <sub>2</sub> en 2050	Limité à 40 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non
LTECV	Basse	-75 % en 2050 par rapport à 1990	Limité à 20 Mt	50 % en 2035 jusqu'à 2050	Non

TABLE 4.14 – Évolution des demandes dans l'industrie

SECTEUR	UNITÉ	HAUT			BAS			
		2014	2030	2050	CROISSANCE	2030	2050	CROISSANCE
Sidérurgie	Mt	16	20	19	16 %	15	14	-16 %
Métaux non-ferreux	Aluminium	0,57	0,61	0,53	-7 %	0,61	0,53	-7 %
	Cuivre	0,04	0,06	0,06	48 %	0,06	0,06	47 %
Produits chimiques	Autres métaux non-ferreux	18	24	27	47 %	24	27	47 %
	Ammoniac	0,91	0,88	0,88	-3 %	0,88	0,88	-3 %
	Chlore	1	1	1	0 %	1	1	0 %
Minéraux non-métalliques	Autres produits chimiques	149	205	226	52 %	205	226	52 %
	Ciment	16,4	17,8	16,5	1 %	17,8	16,5	1 %
	Chaux	2,93	3,17	2,95	1 %	3,17	2,95	1 %
	Verre creux	3,39	3,81	3,48	3 %	3,81	3,48	3 %
	Verre plat	0,70	0,79	0,72	3 %	0,79	0,72	3 %
	Autres	57	79	88	56 %	79	88	56 %
	Extraction	PJ	10	12	13	28 %	12	13
Alimentation	PJ	169	199	209	24 %	199	209	24 %
	Habillement	PJ	11	13	14	28 %	13	14
Papier	Papier Haute Qualité	3,50	3,40	3,40	-3 %	3,40	3,40	-3 %
	Papier Basse Qualité	4,69	4,55	4,55	-3 %	4,55	4,55	-3 %
Matériel de transport	PJ	34	41	44	28 %	41	44	28 %
	Construction mécanique	PJ	67	81	86	28 %	81	86
Bois	PJ	19	22	24	28 %	22	24	28 %
	Autres industries	PJ	93	112	119	28 %	112	119
Consommation non énergétique	Chimie	433	460	470	9 %	373	298	-31 %
	Autres	141	147	149	5 %	122	98	-31 %

Source : Calcul de l'auteur

TABLE 4.15 – Évolution des demandes dans le transport

SECTEUR	UNITÉ	HAUT				BAS			
		2014	2030	2050	CROISSANCE	2030	2050	CROISSANCE	
Voiture	Courte distance	487 942	532 483	622 460	28 %	543 881	547 810	12 %	
	Longue distance	251 258	274 194	320 526	28 %	308 410	364 551	45 %	
VUL	Moto	13 900	14 865	17 377	25 %	15 174	15 371	11 %	
	Passagers	76 500	83 211	97 271	27 %	87 669	92 262	21 %	
	Marchandises	23 000	25 124	29 517	28 %	31 536	41 828	82 %	
Bus	Urbain	18 694	23 615	29 176	56 %	23 118	29 312	57 %	
	Intercité	35 306	44 600	55 102	56 %	43 661	55 360	57 %	
Rail	Poids lourds	265 500	327 693	465 249	75 %	352 103	467 017	76 %	
	Fret ferré	32 217	45 556	66 249	106 %	46 745	54 074	68 %	
	Ferré passagers léger	10 284	12 777	16 544	61 %	12 163	17 465	70 %	
	Ferré passagers	91 916	114 201	147 863	61 %	108 594	155 930	70 %	
Aviation	Aviation nationale	33	43	60	79 %	41	52	55 %	
	Aviation internationale	235	307	413	76 %	307	413	76 %	
Navigation	Navigation nationale	20	24	36	75 %	29	35	74 %	
	Navigation internationale	76	81	89	17 %	81	89	17 %	

VUL : Véhicule utilitaire léger

Source : Calcul de l'autrice

TABLE 4.16 – Évolution des demandes dans le résidentiel

SECTEUR	UNITÉ	HAUT				BAS			
		2014	2030	2050	CROISSANCE	2030	2050	CROISSANCE	
Chauffage	Maison individuelle	635	651	631	-1 %	637	605	-5 %	
	Appartement	287	294	285	-1 %	288	273	-5 %	
ECS	Maison individuelle	111	121	120	8 %	120	120	8 %	
	Appartement	60	65	64	8 %	64	64	8 %	
	Cuisson	106	116	122	15 %	116	122	14 %	
	Électricité spécifique	270	271	254	-6 %	271	254	-6 %	

ECS : Eau chaude sanitaire

Source : Calcul de l'autrice

TABLE 4.17 – Évolution des demandes dans le tertiaire

SECTEUR	UNITÉ	HAUT			BAS				
		2014	2030	2050	CROISSANCE	2030	2050	CROISSANCE	
Chauffage	Chauffage Bureaux	PJ	86	90	100	16 %	91	94	9 %
	Chauffage CaHoRe	PJ	29	31	34	16 %	31	32	9 %
	Chauffage Commerce	PJ	62	65	72	16 %	66	68	9 %
	Chauffage Enseignement	PJ	57	60	66	16 %	60	62	9 %
	Chauffage Habitat communautaire	PJ	22	23	25	16 %	23	24	9 %
	Chauffage Santé	PJ	43	45	50	16 %	45	47	9 %
	Chauffage Sports Loisirs	PJ	26	28	31	16 %	28	29	9 %
	Chauffage Transport	PJ	11	11	13	16 %	12	12	9 %
	ECS Bureaux	PJ	7	8	8	15 %	8	8	15 %
	ECS CaHoRe	PJ	20	21	22	15 %	21	22	15 %
ECS	ECS Commerce	PJ	8	8	9	15 %	8	9	15 %
	ECS Enseignement	PJ	14	14	16	15 %	14	16	15 %
	ECS Habitat communautaire	PJ	9,42	10	11	15 %	10	11	15 %
	ECS Santé	PJ	11	12	13	15 %	12	13	15 %
	ECS Sports Loisirs	PJ	10	10	11	15 %	10	11	15 %
	ECS Transport	PJ	1,2	1,3	1,4	15 %	1,3	1,4	15 %
	Cuisson	PJ	53	56	61	15 %	56	61	15 %
	Électricité spécifique	PJ	350	435	544	56 %	435	478	36 %
	Éclairage public	PJ	21	22	24	15 %	22	24	15 %
	Autres	PJ	33	35	38	15 %	35	38	15 %

CaHoRe : Cafés, hôtels, restaurants

Source : Calcul de l'autrice

TABLE 4.18 – Évolution des demandes dans l’agriculture

SECTEUR	UNITÉ	2014	HAUT			BAS		
			2030	2050	CROISSANCE	2030	2050	CROISSANCE
Bâtiments	PJ	48	48	48	0 %	48	48	0 %
Transformation	PJ	6	6	6	0 %	6	6	0 %
Tracteurs	PJ	107	107	107	0 %	107	107	0 %
Autres	PJ	27	27	27	0 %	27	27	0 %

Source : Calcul de l’auteur

BRGM<sup>15</sup> (MICHEL et MENARD, 2009) tandis que la valeur de 20 MtCO<sub>2</sub> est celle retenue dans le cadre de la commission Quinet. Sur ce potentiel, 6,5 MtCO<sub>2</sub> au maximum peuvent être captés du secteur industriel pour être séquestrés.

Les prix des ressources énergétiques primaires sont spécifiés de manière exogène et sont dérivés du scénario *Sustainable Development* du WEO 2017 de l’AIE (2017). Les prix du CO<sub>2</sub> dans le système européen d’échange de quotas d’émissions (ETS) proviennent du scénario de référence 2016 de l’UE. Une taxe carbone est également appliquée dans les secteurs résidentiel, tertiaire et transport avec une valeur de 14,5 €/tCO<sub>2</sub> en 2015, 65,4 €/tCO<sub>2</sub> en 2020 et 100 €/tCO<sub>2</sub> de 2030 à 2050 conformément aux objectifs de la LTECV. Le taux d’actualisation est de 4,5 % en France, conformément aux recommandations de QUINET (2013). L’horizon des scénarios est l’année 2050.

Pour ajouter de la flexibilité dans le modèle, on introduit des technologies qui permettent de satisfaire la même demande mais substituent les énergies fossiles par des renouvelables, en particulier dans l’agriculture, le tertiaire (secteur « autres »), ainsi que le transport pour l’aviation et le maritime. Par exemple au lieu d’utiliser du pétrole, la technologie peut recourir à des biocarburants. Ces technologies sont disponibles à partir de 2030 à un coût nul. Cette option est désignée par Flex et permet dans le cas de scénarios sans cela infaisables de satisfaire les contraintes.

#### 4.2.2 Les difficultés pour atteindre la neutralité carbone

Nous proposons une évaluation des trajectoires de neutralité carbone à l’horizon 2050. Pour rendre notre analyse robuste, nous avons réalisé une variation autour de notre scénario central *NeutralityV2 - CCSLow* qui correspond à une stratégie respectant les objectifs principaux de la France, à savoir un objectif de neutralité carbone et une réduction de la part du nucléaire à 50 % dans la production d’électri-

15. Bureau de recherches géologiques et minières.

citée en 2035. Nous évaluerons la faisabilité de l'objectif de neutralité carbone grâce à une analyse de sensibilité autour de ce scénario et suivant une déclinaison de différentes variantes : la disponibilité du captage et du stockage du CO<sub>2</sub>, le déploiement de nouvelles centrales nucléaires, le niveau de la demande et la contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub>.

#### *Disponibilité de technologies à grandes incertitudes : CCS et nucléaire*

La disponibilité du CCS en France est encore incertaine. L'étude technique de référence sur le captage et le stockage du CO<sub>2</sub> a été réalisée par le BRGM (MICHEL et MENARD, 2009), qui a élaboré quatre scénarios d'évolution pour la filière jusqu'à 2050. Publié il y a 10 ans, le rapport prévoyait un potentiel annuel de stockage de 34 à 54 MtCO<sub>2</sub> en 2020 en fonction de la disponibilité des sites de stockage, et de 40 à 66 MtCO<sub>2</sub> en 2050. La France est actuellement très loin des potentiels envisagés pour 2020 puisqu'aucun démonstrateur n'est en cours d'utilisation, limitant les perspectives de développement. Ainsi, le projet pilote mené par Total à Lacq s'est achevé en 2013, mais aucune extension n'a été annoncée et ce, bien que les organismes nationaux encouragent la recherche sur le captage et le stockage du carbone. Il est donc admis que la valeur haute du rapport du BRGM ne pourra être atteinte et que l'option basse de 2009 est plutôt devenue l'option optimiste d'aujourd'hui. Ainsi, dans les dernières projections officielles (DGEC, 2019) ainsi que dans le rapport officiel sur la valeur du carbone (QUINET et al., 2019), le niveau de captage et de stockage du CO<sub>2</sub> atteint respectivement 15 et 20 MtCO<sub>2</sub>, exprimant les nombreuses incertitudes qui subsistent concernant les capacités de stockage, l'acceptabilité sociale, la disponibilité des technologies et le potentiel lié aux industries. Si on impose la non-disponibilité du CCS dans notre scénario initial (NeutralityV2\_NoCCS), le système se trouve dans un état « sur-contraint ». Pour respecter les contraintes, le modèle doit recourir à des importations virtuelles, c'est-à-dire des importations de matériaux, d'énergie ou de demandes à un prix très élevé qui permettent de satisfaire les différents besoins. Les résultats associés au scénario NeutralityV2\_NoCCS ne seront donc pas présentés. A fortiori, dans un scénario avec une demande plus élevée, NeutralityV2\_NoCCS\_Dhigh, on obtient le même résultat.

Une importante partie du parc nucléaire français a été construit très rapidement en une dizaine d'années entre 1978 et 1992. La durée de vie de ces centrales était initialement prévue pour s'élever à 40 ans mais cela implique une décroissance brutale de leur production d'électricité à partir de 2020. Pour compenser cet effet falaise dans l'évolution des capacités électriques, plusieurs options sont possibles : construire de nouvelles capacités de production, étendre la durée de vie des centrales nucléaires ou combiner les deux options précédentes. Le coût de l'extension des centrales nucléaires (le grand carénage) a été estimé

à 100 Mrds€ par le dernier rapport de la COUR DES COMPTES (2016). Le financement d'un tel plan est soumis à de nombreuses incertitudes. L'objectif de la LTECV de réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité avait été fixé à l'origine pour 2025 mais a été reporté en 2035<sup>16</sup>. La fermeture de la centrale de Fessenheim a aussi été reportée d'année en année et a de nouveau été décalée en 2019 à cause du retard dans le démarrage de la centrale de Flammanville. La fermeture de Fessenheim d'ici 2023 fait toutefois partie des engagements pris dans la dernière PPE (MTES, 2019). Ce projet de PPE prévoit également une fermeture de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035 mais le calendrier officiel n'est pas fixé précisément. D'autre part, l'évolution des capacités renouvelables ne suit pour l'instant pas la trajectoire prévue (SDES, 2019b; RÜDINGER, 2018a). Enfin, la construction de nouvelles centrales nucléaires n'est pour le moment pas ou peu évoquée en raison de débats politiques, d'incertitudes concernant les coûts et l'acceptabilité sociale. Il est donc intéressant d'envisager un scénario dans lequel aucune nouvelle centrale nucléaire ne peut être construite. Dans ce scénario *NeutralityV2\_CCSHigh\_NoNuc*, le potentiel de CCS a été augmenté pour atteindre 40 Mt. Malgré cette flexibilité supplémentaire, le système se trouve dans un état « surcontraint » et doit faire appel à des importations virtuelles. A fortiori dans un scénario où la demande est plus élevée *NeutralityV2\_CCSHigh\_Dhigh\_NoNuc*, les importations virtuelles sont aussi nécessaires.

Dans les scénarios avec une indisponibilité de technologies CCS ou nucléaires qui sont soumises à de fortes incertitudes sur leur déploiement, le système se trouve dans un état « surcontraint ». L'ensemble des contraintes imposées au système est trop important et elles ne peuvent être toutes satisfaites en même temps. Dans un scénario *NeutralityV2\_NoCCS\_NoNuc* avec une indisponibilité à la fois du CCS et des nouvelles centrales nucléaires, les importations virtuelles augmentent de manière significative. Ce résultat ne veut pas dire qu'il faut déployer absolument des procédés de CCS ou de nouvelles centrales nucléaires mais souligne uniquement que satisfaire à la fois la contrainte de neutralité carbone, de réduction de la part du nucléaire et l'indisponibilité de technologies de stockage ne permet pas de résoudre le problème d'optimisation sous-jacent à ces contraintes pour le système énergétique français. Il faut donc redonner de la flexibilité au modèle pour qu'une solution puisse être trouvée. Ainsi, lorsqu'on ajoute de la flexibilité (Flex) au scénario *NeutralityV2\_NoCCS*, le système n'est plus « surcontraint » (cas du *NeutralityV2\_NoCCS\_Flex*). Cependant, si on rajoute de la flexibilité au scénario sans nucléaire (*NeutralityV2\_CCSHigh\_NoNuc\_Flex*), le système reste « surcontraint ».

---

16. La loi n'a pas encore été modifiée officiellement mais devrait l'être en 2019.

### *La contrainte de neutralité carbone*

L'évolution de la contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> reflète les incertitudes sur la disponibilité de sources de flexibilité (puits carbone lié à [UTCATF](#) par exemple) qui rend la contrainte plus ou moins forte en 2050. Dans le scénario central *NeutralityV2\_CCSLow*, l'objectif est donc d'atteindre 11 MtCO<sub>2</sub>. Si la contrainte devient plus stricte à cause d'une disponibilité moindre des puits comme dans le scénario *NeutralityV0\_CCSLow*, des importations virtuelles sont nécessaires.

Cependant, si on ajoute de la flexibilité, le scénario *NeutralityV0\_CCSLow\_Flex* ne recourt pas à des importations virtuelles. Par rapport à notre scénario central, si la demande est plus élevée comme dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow\_Dhigh*, on n'utilise pas non plus d'importation virtuelle. Ce scénario fonctionne toujours à la condition que les technologies [CCS](#) et nucléaire soient disponibles (comme nous l'avons vu précédemment).

Si la demande est plus forte ainsi que la contrainte de neutralité carbone, alors le scénario *NeutralityV0\_CCSLow\_Dhigh* doit également recourir à des importations virtuelles. Dans ce cas, même si on rajoute de la flexibilité supplémentaire, le scénario *NeutralityV0\_CCSLow\_Dhigh\_Flex* reste dans cet état « surcontraint ». Pour que la demande plus élevée soit satisfaite ainsi que la contrainte plus stricte de neutralité carbone, il faut augmenter le potentiel de [CCS](#). Ainsi, le scénario *NeutralityV0\_CCSHigh\_Dhigh* permet de satisfaire toutes les contraintes.

Le [Tableau 4.19](#) récapitule les scénarios ayant recours aux importations virtuelles.

### *Résultats de l'exercice prospectif*

Dans cette partie, nous évoquerons uniquement les scénarios qui convergent avec les contraintes imposées en nous limitant aux scénarios suivants : *NeutralityV2\_CCSLow*, *NeutralityV2\_CCSLow\_Dhigh*, *NeutralityV0\_CCSLow\_Flex* et *NeutralityV0\_CCSHigh\_Dhigh*.

**Consommation d'énergie finale** La consommation d'énergie finale (voir [Figure 4.6](#)) diminue de 21 % dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow* et jusqu'à 25 % dans le scénario *NeutralityV0\_CCSLow\_Flex*, avec une contrainte de neutralité carbone plus importante et de la flexibilité incluse. Si la disponibilité du [CCS](#) est supérieure ou s'il n'y a pas de limite sur le nucléaire, la diminution est modérée. Dans tous les scénarios, la consommation d'électricité augmente fortement et atteint entre 49 et 54 % de la consommation totale d'énergie finale. La consommation de gaz augmente jusqu'en 2030 mais diminue ensuite pour atteindre environ 3 % de la consommation totale dans la plupart des scénarios, sauf dans *NeutralityV0\_CCSLow\_Flex* où

TABLE 4.19 – Faisabilité des scénarios Neutralité

SCÉNARIO	IMPORTS VIRTUELS
NeutralityV2_CCSLow	Non
NeutralityV2_NoCCS	Oui
NeutralityV2_NoCCS_Flex	Non
NeutralityV2_NoCCS_NoNuc	Oui
NeutralityV2_CCSHigh_NoNuc	Oui
NeutralityV2_CCSHigh_NoNuc_Flex	Oui
NeutralityV0_CCSLow	Oui
NeutralityV0_CCSLow_Flex	Non
NeutralityV2_CCSLow_Dhigh	Non
NeutralityV2_NoCCS_Dhigh	Oui
NeutralityV2_CCSHigh_Dhigh_NoNuc	Oui
NeutralityV0_CCSLow_Dhigh	Oui
NeutralityV0_CCSLow_Dhigh_Flex	Oui
NeutralityV0_CCSHigh_Dhigh	Non
LTECV	Non

elle reste pratiquement stable. Cependant, si l'on prend en compte la consommation de biométhane qui circule dans le réseau de gaz, le vecteur gaz joue toujours un rôle important en 2050 puisqu'il représente de 10 à 14 % de la consommation totale d'énergie finale. Ce vecteur est alors composé, suivant les scénarios, de gaz naturel, de biométhane et éventuellement de dihydrogène sauf dans le scénario NeutralityV0\_CCSLow\_Flex où le vecteur gaz est uniquement composé de biométhane. Le développement de dihydrogène est favorisé lorsque le CCS n'est pas disponible. Le cas le plus favorable se trouve dans le scénario NeutralityV2\_NoCCS\_Flex où la production d'hydrogène atteint sa borne maximale (la part d'hydrogène dans le réseau de gaz est en effet limité à 5 % du volume). En outre, plus la contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> est stricte (contrainte V0), plus la biomasse est utilisée pour les émissions négatives au lieu d'être directement consommée en énergie finale : sa consommation s'élève de 31 à 34 Mtep dans les scénarios Neutrality\_V2 contre 28 à 29 Mtep dans les scénarios Neutrality\_V0.

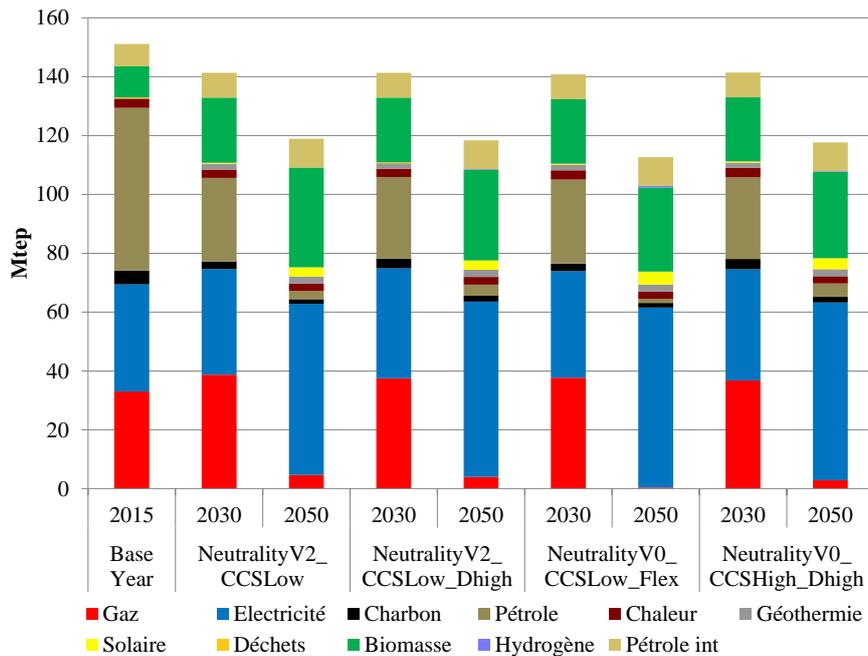


FIGURE 4.6 – Consommation d'énergie finale dans les scénarios Neutralité

Remarque : le pétrole int. correspond au pétrole consommé dans les secteurs internationaux de l'aviation et du maritime. Il est différencié des autres énergies car les émissions associées ne sont pas contraintes.

**Émissions CO<sub>2</sub>** Le respect de la contrainte de neutralité carbone est possible grâce à une augmentation massive de la production d'électricité mais également au développement du CCS, et en particulier des émissions négatives (voir Figure 4.7). Ces émissions négatives proviennent de la valorisation énergétique de biomasse avec captage et séquestration du carbone (BECCS<sup>17</sup>) dans le secteur de l'électricité mais également de l'épuration du biogaz en biométhane dans le secteur du Supply (voir Figure 4.8). En effet, pour injecter du biogaz dans le réseau de gaz, le CO<sub>2</sub> contenu doit être éliminé pour obtenir du biométhane. Le stockage dans le sous-sol du CO<sub>2</sub> issu de la combustion de biomasse permet de réaliser des émissions négatives car les émissions associées à l'utilisation de biomasse sont considérées comme nulles. Lorsque le potentiel de CCS est élevé, la limite sur les émissions CO<sub>2</sub> provenant de la purification du biogaz pousse le modèle à développer le CCS dans le secteur de l'électricité avec l'installation de capacité BECCS.

17. *Bioenergy with carbon capture and storage*

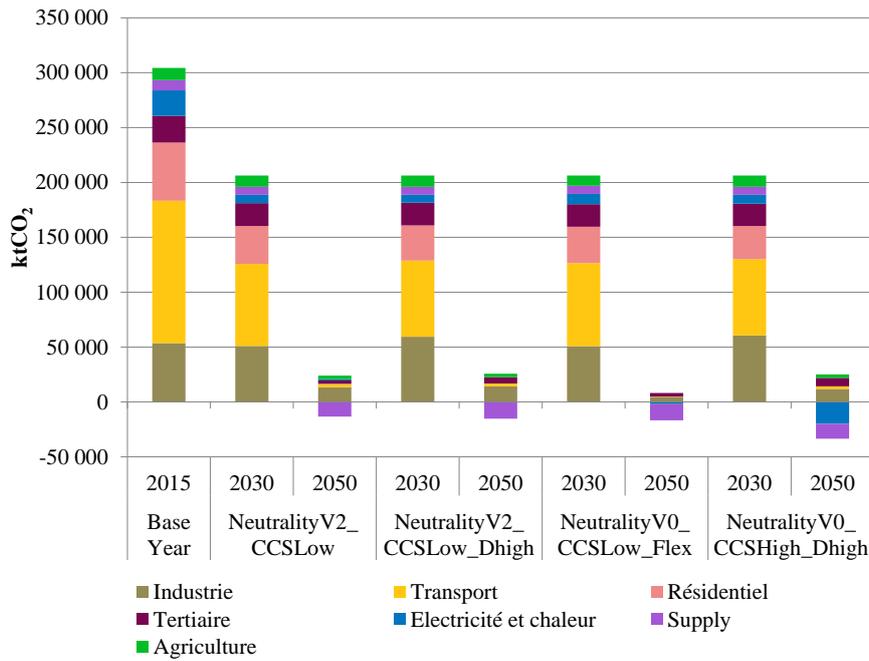


FIGURE 4.7 – Émissions CO<sub>2</sub> dans les scénarios Neutralité

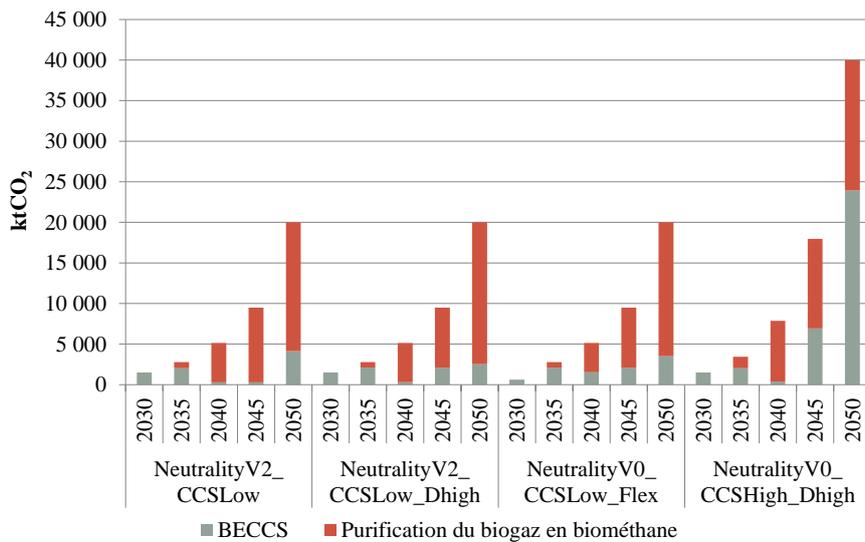
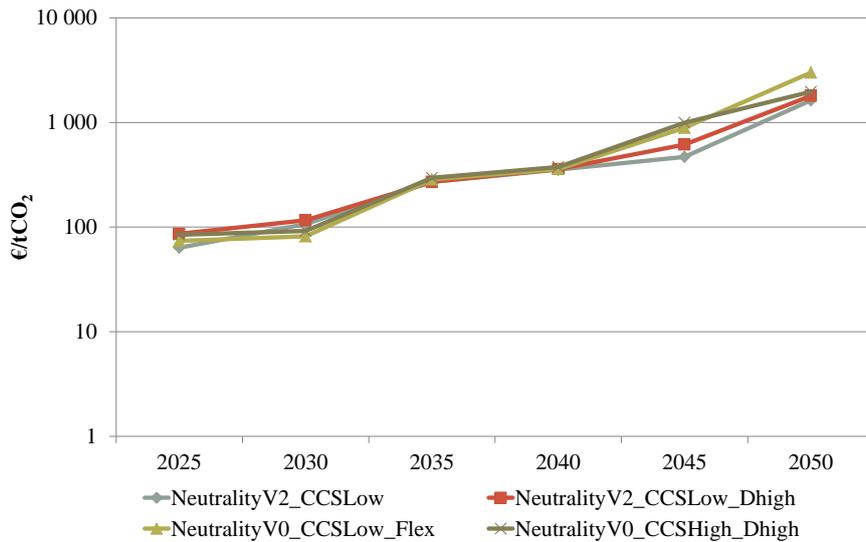


FIGURE 4.8 – Émissions CO<sub>2</sub> capturées et stockées dans les scénarios Neutralité

**Coût marginal du CO<sub>2</sub>** Le coût marginal du CO<sub>2</sub> en 2050 s'élève dans tous les scénarios à plus de 1 500 €/tCO<sub>2</sub> (voir Figure 4.9). La contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> est donc très coûteuse à satisfaire et, comme nous l'avons évoqué au début de cette partie, sa satisfaction est soumise à des hypothèses sur la disponibilité de certaines technologies comme le CCS ou le nucléaire dont les déploiements ne sont pas garantis dans le futur.

FIGURE 4.9 – Coût marginal du CO<sub>2</sub> dans les scénarios Neutralité

**Industrie** Dans tous les scénarios, l'électrification de l'industrie est très importante puisque ce vecteur représente entre 65 et 71 % de la consommation d'énergie finale du secteur (voir Figure 4.10). La consommation de biomasse double dans tous les scénarios. La consommation de gaz augmente entre 2015 et 2030 mais décroît ensuite rapidement jusqu'en 2050. La consommation de charbon et de pétrole diminue fortement mais n'est pas complètement éliminée car il n'y a pas de substitution possible pour certains procédés, par exemple dans la sidérurgie. Dans ces scénarios, le CCS n'est pas utilisé dans l'industrie car il est plus intéressant de l'utiliser en l'associant à de la biomasse pour obtenir des émissions négatives et d'électrifier l'industrie.

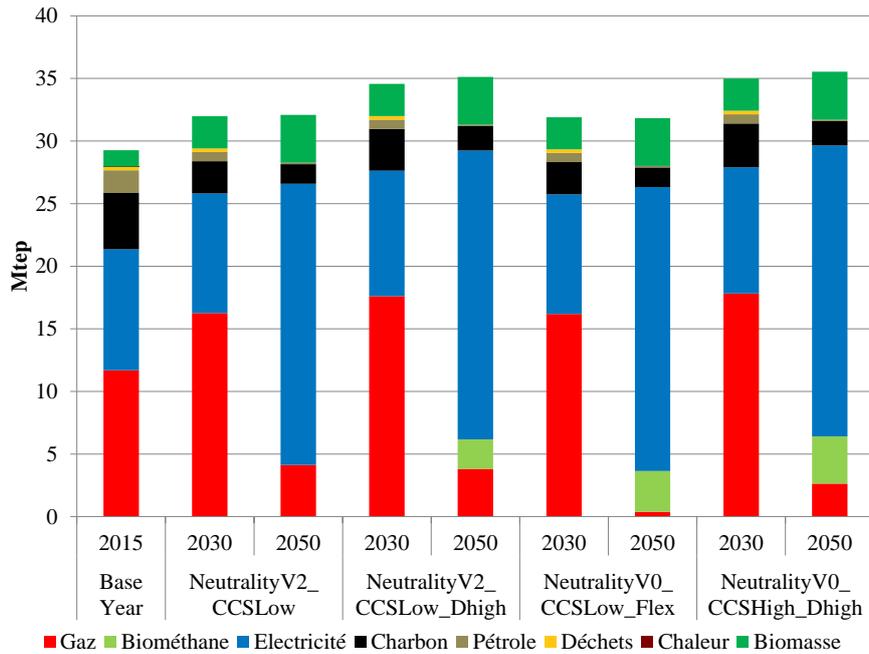


FIGURE 4.10 – Consommation d'énergie finale de l'industrie dans les scénarios Neutralité

**Transport** La consommation d'énergie finale dans le secteur du transport (voir [Figure 4.11](#)) décroît de 32 % dans le scénario central NeutralityV2\_CCSLow à 35 % dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow\_Dhigh et NeutralityV0\_CCSHigh\_Dhigh. Le secteur des transports s'électrifie lui aussi de façon importante : en 2050, le parc de voitures est composé de voitures électriques ou rechargeables. Le gaz naturel est utilisé de manière transitoire et atteint son pic suivant les scénarios en 2035 ou 2040. Son utilisation décroît ensuite très rapidement pour disparaître en 2050. Cependant, si le gaz naturel n'est plus utilisé, le vecteur gaz composé de biométhane se développe entre 2030 et 2050. Le parc de bus et de **VUL** pour les marchandises est ainsi composé en grande partie de véhicules fonctionnant au gaz.

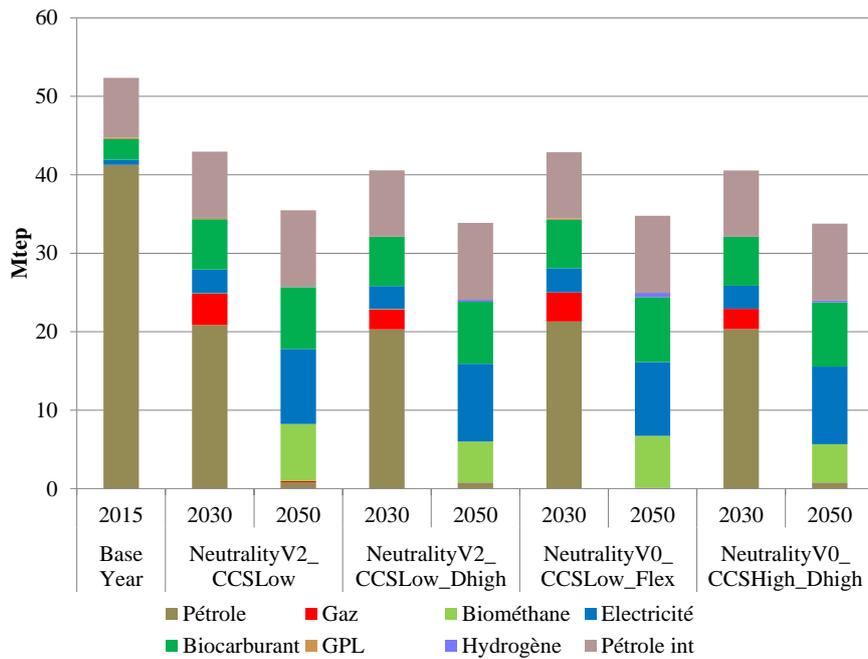


FIGURE 4.11 – Consommation d'énergie finale du transport dans les scénarios Neutralité

**Bâtiments** Grâce au développement important de l'isolation et des systèmes de chauffage PAC, la consommation d'énergie finale des secteurs résidentiel et tertiaire diminue fortement, de 27 % dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow à 35 % dans NeutralityV0\_CCSLow\_Flex. Les scénarios sans nucléaire limitent le déploiement de l'électricité et favorisent le recours à l'isolation. L'utilisation de la biomasse croît entre 2015 et 2030 en passant de 7 à 12 Mtep mais diminue par la suite car il est plus intéressant pour le modèle d'utiliser cette biomasse dans les autres secteurs et en particulier pour faire des émissions négatives. Dans les scénarios avec une forte contrainte sur la neutralité carbone (scénarios V0), la décroissance de la biomasse est ainsi plus importante.

Dans le secteur tertiaire, le recours à la géothermie ainsi qu'aux réseaux de chaleur augmente alors que l'utilisation de gaz diminue fortement. Le chauffage solaire se développe à la marge. Dans le secteur résidentiel, la consommation d'électricité baisse de 34 % dans le scénario central NeutralityV2\_CCSLow mais de 3 % seulement dans le scénario NeutralityV0\_CCSLow\_Flex.

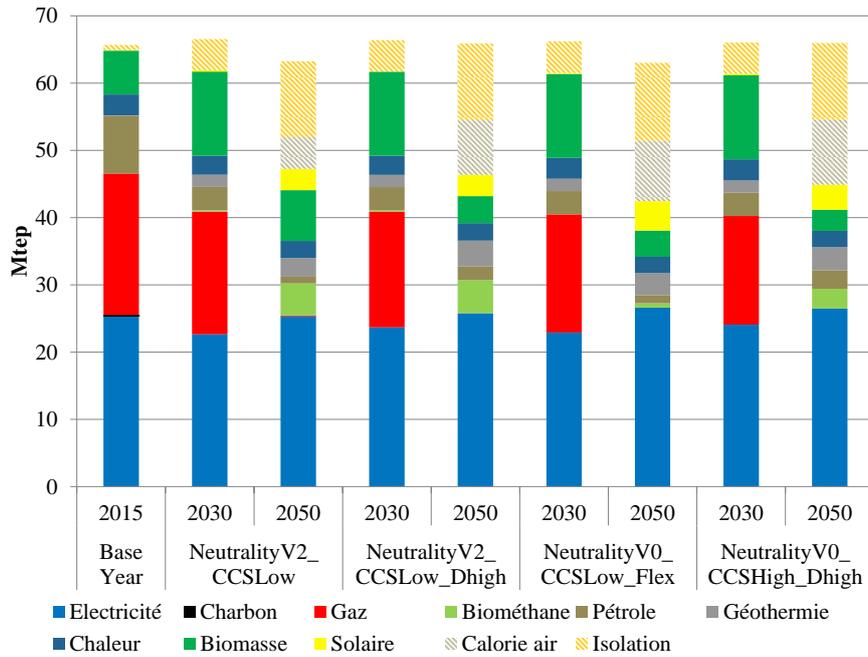


FIGURE 4.12 – Consommation d'énergie finale des bâtiments dans les scénarios Neutralité

**Production d'électricité** Les capacités installées (voir Figure 4.13) augmentent fortement dans tous les scénarios et atteignent pratiquement 250 GW en 2050. Cette croissance est poussée en grande partie par celle des énergies renouvelables photovoltaïques et éoliennes qui atteignent respectivement 78,5 GW et 74 GW. Les capacités charbons sont nulles en 2020. Les capacités fiouls sont encore présentes de manière marginale de 2025 à 2040 pour assurer l'équilibre à la pointe. Les capacités gaz augmentent entre 2015 et 2040 avant de décroître rapidement à 6,5 GW en 2050. Les principales différences entre les scénarios Neutralité concernent le niveau d'installation de capacités biomasses. En 2050, le scénario NeutralityV0\_CCSHigh\_Dhigh avec un fort potentiel de CCS conduit à une installation importante de capacités BECCS. Dans les autres scénarios, les capacités BECCS sont plus limitées, autour de 0,6 GW mais davantage de capacités biomasses sont installées, 2 GW dans NeutralityV2\_CCSLow, 3,7 GW dans NeutralityV2\_CCSLow\_Dhigh et 5,2 GW dans NeutralityV0\_CCSLow\_Flex. Concernant l'évolution des capacités nucléaires, toutes les centrales existantes ne sont pas prolongées ce qui conduit entre 2014 et 2035 à une décroissance des capacités qui atteignent 36 GW dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow et 38 GW dans les autres scénarios. Cependant, à partir de 2040, de nouvelles centrales sont installées provoquant une augmentation très rapide des capacités nucléaires qui atteignent en 2050 de 51 GW dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow à 54 GW dans le scénario NeutralityV0\_CCSLow\_Flex. Pour préciser, le rythme d'installation maximal possible dans le modèle correspond à 2

EPR par an à partir de 2035, soit le rythme suivi lors du programme électro-nucléaire dans les années 1980.

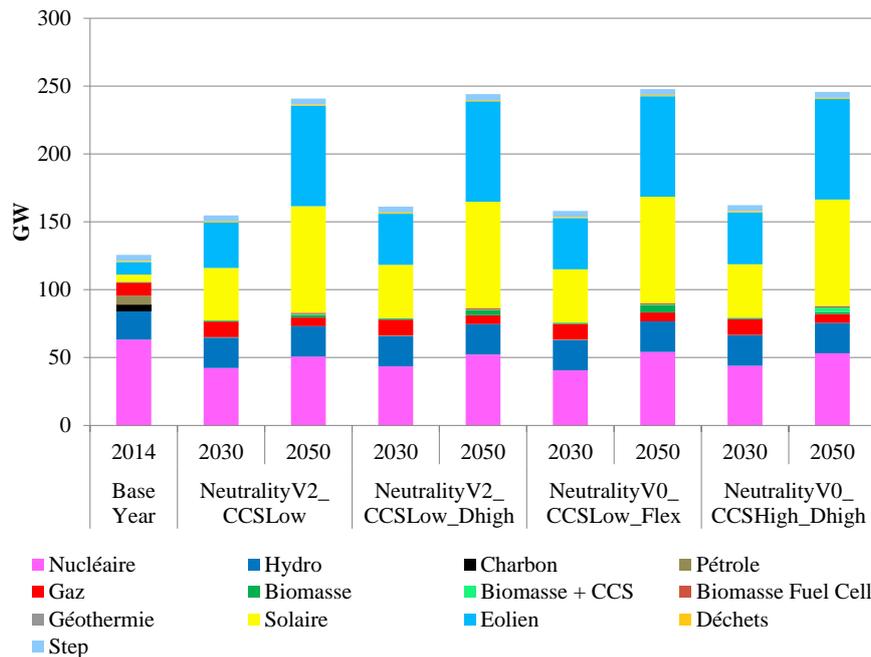


FIGURE 4.13 – Capacités électriques dans les scénarios Neutralité

Malgré l'augmentation des capacités électriques, la production d'électricité (voir Figure 4.14) diminue entre 2014 et 2030 dans tous les scénarios, de 13 % dans NeutralityV2\_CCShigh\_Dhigh à 9 % dans NeutralityV0\_CCShigh\_Dhigh. Cette diminution est suivie par une croissance importante puisqu'en 2050 par rapport à 2015, le vecteur électrique croît de 29 % dans NeutralityV2\_CCShigh\_Dhigh à 37 % dans NeutralityV0\_CCShigh\_Dhigh. La part du nucléaire dans la production est encore supérieure à 50 % en 2030 et est maintenue autour de 50 % avec l'installation de nouvelles capacités jusqu'à la fin de l'horizon.

La baisse de la production entre 2014 et 2030 ne signifie pas que la consommation d'électricité totale baisse. La production peut diminuer et la consommation rester stable parce que le volume d'export diminue fortement entre 2014 et 2030. De plus, la baisse de la consommation d'électricité dans le résidentiel est compensée par l'augmentation de celle du secteur du transport (voir Figure 4.15). Entre 2030 et 2050, l'augmentation de la production d'électricité résulte de la forte croissance du vecteur électricité dans les secteurs de l'industrie et du transport.

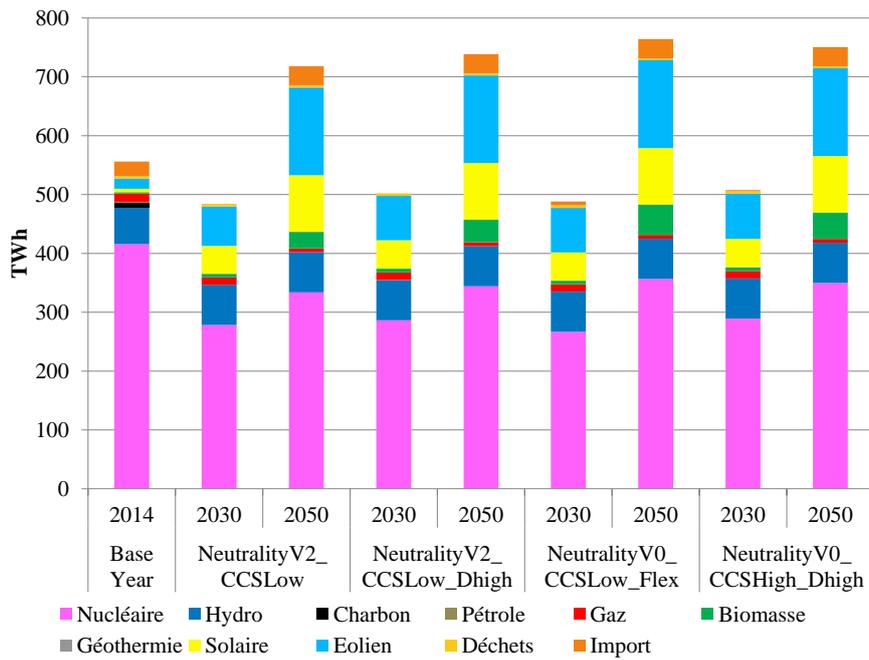


FIGURE 4.14 – Production d’électricité dans les scénarios Neutralité

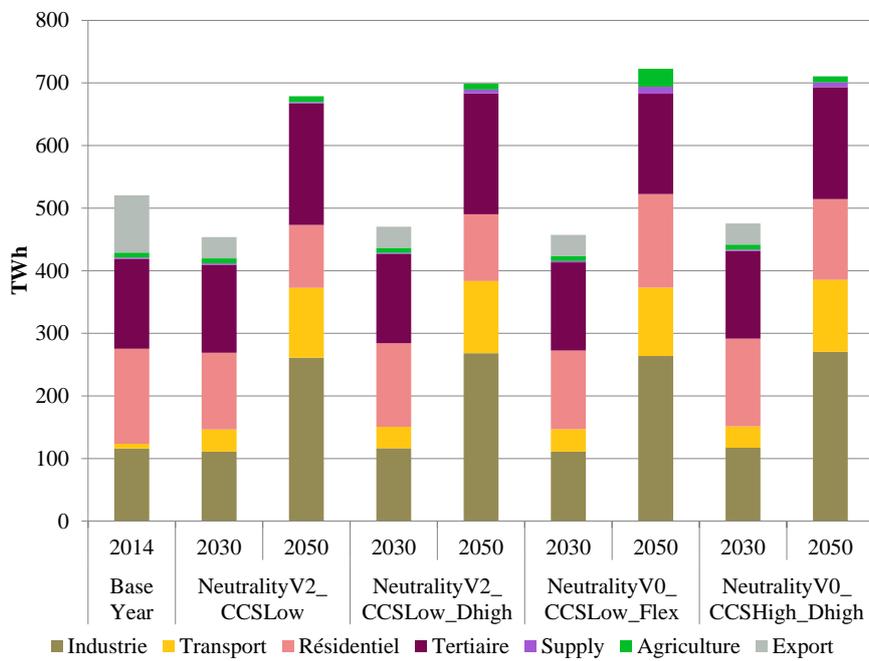


FIGURE 4.15 – Consommation d’électricité dans les scénarios Neutralité

**Réseaux de chaleur** La production des réseaux de chaleur augmente légèrement entre 2014 et 2030 dans les scénarios Neutralité. Entre 2030 et 2050, la production décroît et retrouve son niveau initial de 33 Mtep dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et NeutralityV2\_CCSLow\_Dhigh et même en dessous pour les scénarios NeutralityV0\_CCSLow\_Flex et NeutralityV0\_CCSHigh\_Dhigh. La production de chaleur associée au charbon et au pétrole diminue fortement et la production à partir de la géothermie et de la biomasse se développe. L'utilisation des déchets dans les réseaux de chaleur a diminué en 2050 car elle est à l'origine d'émissions CO<sub>2</sub>.

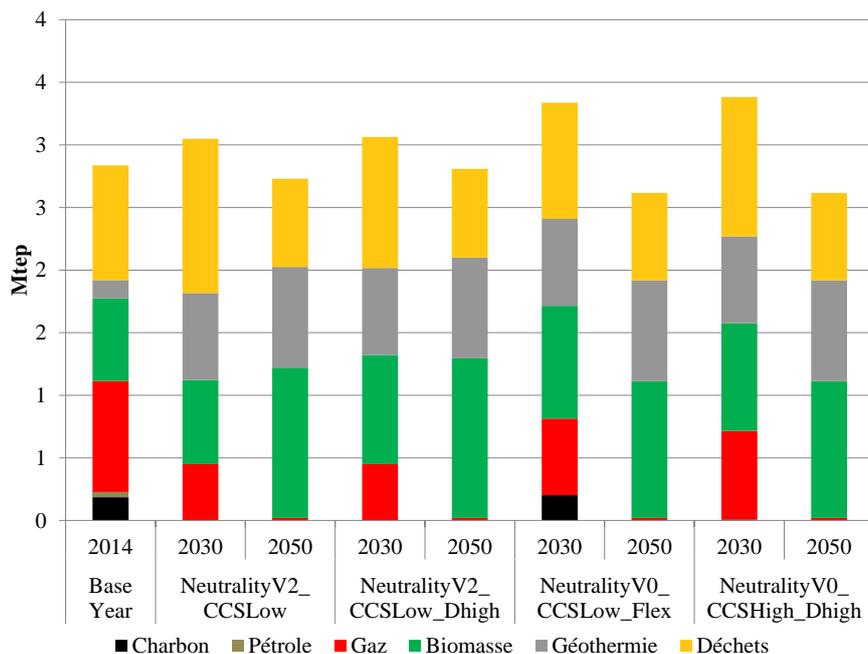


FIGURE 4.16 – Production de chaleur dans les scénarios Neutralité

L'analyse des scénarios Neutralité montre que la faisabilité de cet objectif dépend fortement de la disponibilité de certaines technologies clés comme le CCS et le nucléaire dont le déploiement n'est pas garanti. Si celles-ci ne sont pas disponibles, la trajectoire pour atteindre la neutralité carbone devra s'appuyer sur d'autres mesures comme une modification des demandes de service énergétique, associée à une évolution des modes de vie. Les principales différences entre les scénarios Neutralité résident dans le niveau d'émissions négatives permises par le déploiement de BECCS et l'épuration de biogaz, dans la structure énergétique du secteur du bâtiment et dans le niveau du recours à l'hydrogène. Ces différentes options nécessitent un engagement à long terme pour enclencher des investissements suffisants et un pilotage fin des changements technologiques associés.

### 4.2.3 Les différences entre un scénario Neutralité et un scénario LTECV

Dans cette partie, nous comparons la trajectoire d'un scénario neutralité carbone (scénario central de la [sous-section 4.2.2](#) *NeutralityV2\_CCSLow*) à celle d'un scénario LTECV. Celui-ci prend comme contrainte les principaux objectifs de la loi : réduction des émissions CO<sub>2</sub> de 75 % en 2050 par rapport à 1990, limitation de la part du nucléaire à 50 % à partir de 2035<sup>18</sup>, part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale de 32 % en 2030 et dans la production d'électricité de 40 %, réduction de la consommation des énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à 2012 et réduction de la consommation d'énergie finale totale. Dans la loi, l'objectif est de réduire les consommations de 50 % en 2050 par rapport à 2012 mais cette contrainte ne peut pas être satisfaite par le modèle qui doit alors recourir à des importations virtuelles. Cette dernière contrainte a donc été modifiée pour qu'elle soit satisfaite sans recours aux importations virtuelles. La limite a été trouvée à 37 % (référence 2012). Cette contrainte a été imposée sur les consommations d'énergie finale hors consommations liées aux secteurs internationaux (aviation et maritime international).

#### *Résultats de l'exercice prospectif*

**Consommation d'énergie finale** Si on prend en compte l'énergie liée aux secteurs internationaux, la consommation d'énergie finale diminue en 2050 par rapport à 2015 de 21 % dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow* et de 32 % dans le scénario LTECV (respectivement 24 % et 35 % si on ne prend pas en compte les secteurs internationaux). La contrainte de réduction de la consommation d'énergie finale est donc très forte dans le scénario LTECV et limite la croissance des vecteurs électricité et biomasse comparativement à celle du scénario *NeutralityV2\_CCSLow*. En 2050, l'électricité représente près de 49 % de la consommation d'énergie finale dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow* mais 41 % dans le scénario LTECV ; la biomasse, 31 % dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow* et 19 % dans le scénario LTECV. La croissance de l'électricité et de la biomasse est donc beaucoup plus importante dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow* que LTECV et ce dès 2030 où la consommation de biomasse est bien supérieure dans *NeutralityV2\_CCSLow* (22 Mtep) à celle de LTECV (16 Mtep). Une autre différence importante se situe dans l'évolution du vecteur gaz : le gaz naturel représente encore 23 % de la consommation d'énergie finale totale dans le scénario LTECV mais uniquement 4 % dans le scénario *NeutralityV2\_CCSLow*. La composition du vecteur gaz circulant dans le réseau (voir [Figure 4.18](#)) est très différente dans les deux scénarios : il est composé en grande partie de gaz naturel dans le scénario

<sup>18</sup>. La date initiale de 2025 n'étant plus d'actualité, nous avons choisi de garder 2035.

LTECV alors qu'il est majoritairement constitué de biométhane dans NeutralityV2\_CCSLow.

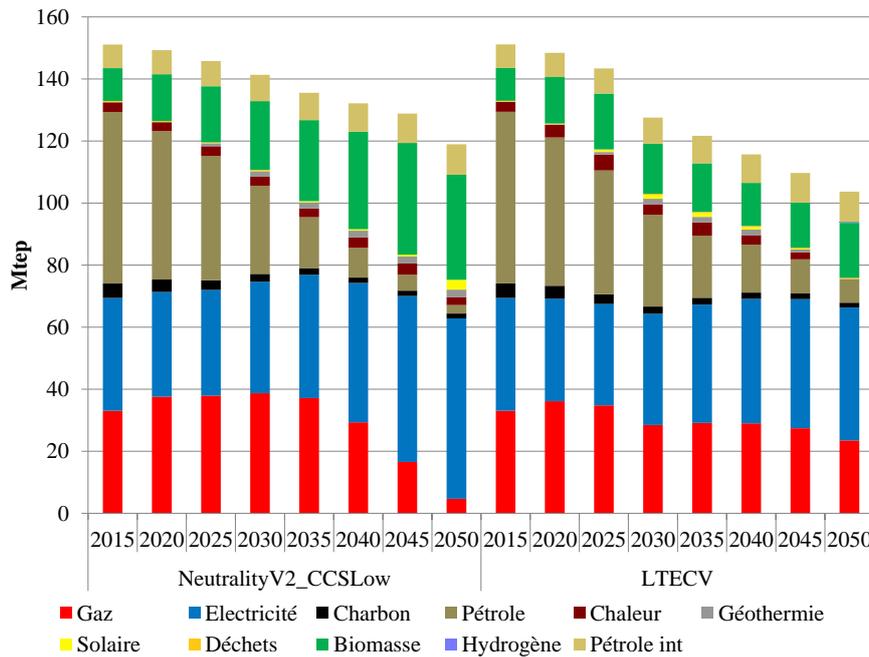


FIGURE 4.17 – Consommation d'énergie finale dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

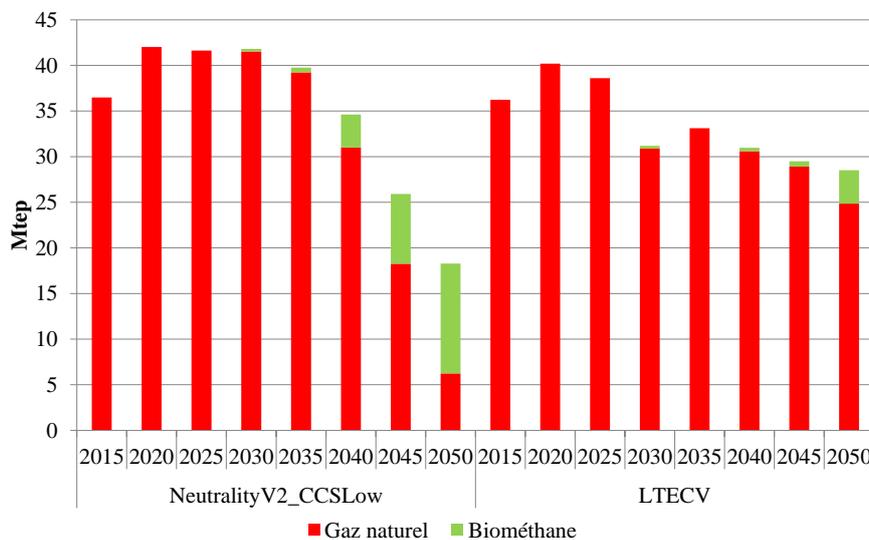


FIGURE 4.18 – Composition du vecteur gaz dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Émissions CO<sub>2</sub>** Dans les deux scénarios, l'atteinte de la neutralité carbone passe par des émissions négatives mais leur origine diffère (Figure 4.19) : dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow, elles proviennent

principalement de l'épuration du biogaz en biométhane (secteur Supply) tandis que dans le scénario LTECV, elles proviennent uniquement des capacités BECCS dans le secteur électrique. On note que dans les deux scénarios, le potentiel CCS est à son maximum mais que dans le scénario LTECV, le développement du CCS se fait plus tardivement, à partir de 2040 contre 2030 dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow.

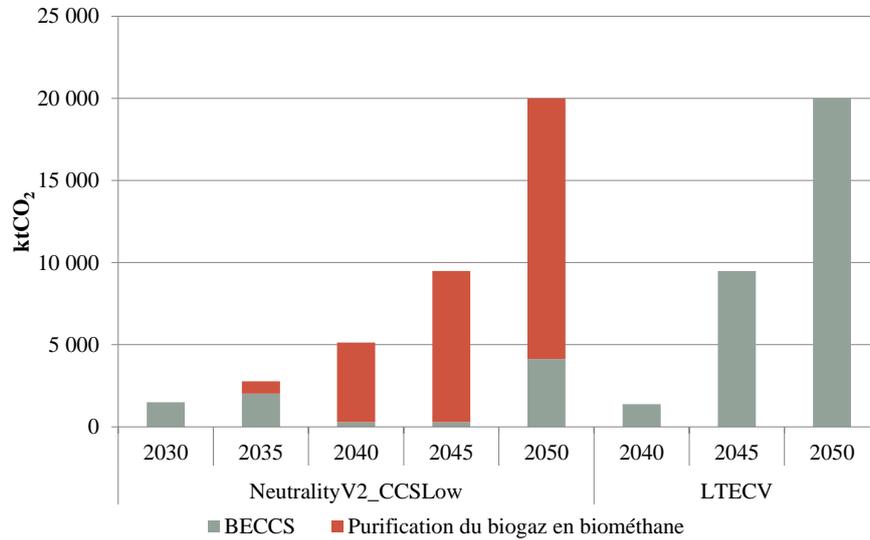


FIGURE 4.19 – Émissions CO<sub>2</sub> capturées et stockées dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

Dans les deux scénarios, le transport est l'un des premiers secteurs à se décarboner (voir Figure 4.20), l'industrie étant quant à elle le dernier. Dans le scénario LTECV, les émissions de ce secteur restent d'ailleurs à peu près constantes tandis qu'elles baissent uniquement en fin d'horizon dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow.

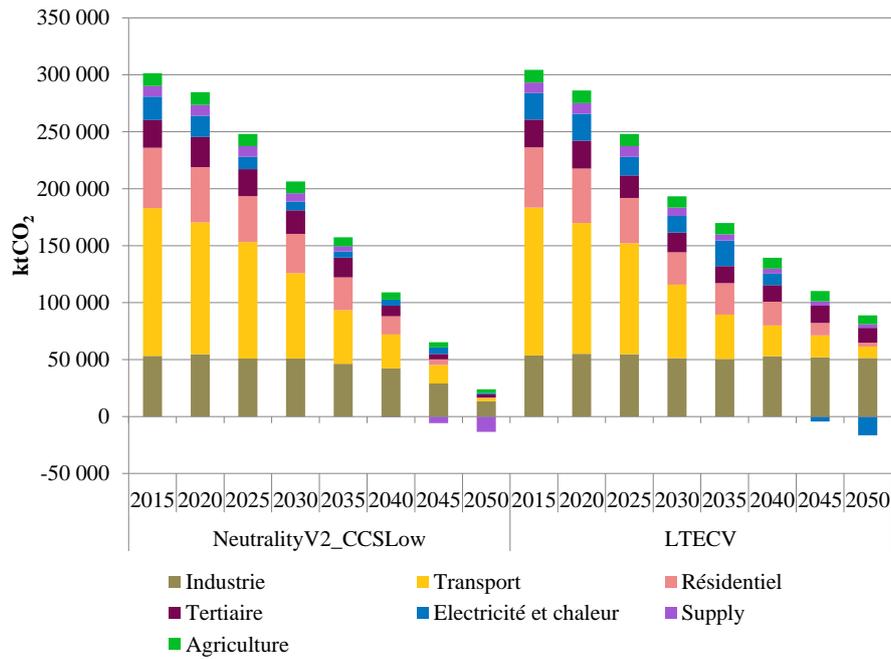


FIGURE 4.20 – Émissions CO<sub>2</sub> dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Coût marginal du CO<sub>2</sub>** Pour le scénario LTECV, il n’y a pas de coût marginal du CO<sub>2</sub> pour les années 2030 et 2035 car le respect des autres contraintes (consommation d’énergie finale et part des renouvelables) entraîne une diminution des émissions CO<sub>2</sub> plus importante que l’objectif fixé. La contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> n’étant pas saturée, la variation d’une tonne de la contrainte sur les émissions ne change donc pas le coût du système.

Jusqu’en 2030, le niveau de la contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> est similaire dans les deux scénarios puisqu’ils doivent tous deux suivre une trajectoire menant à 40 % de réduction des émissions en 2030 par rapport à 1990. Cependant, le coût marginal en 2025 est beaucoup plus bas dans le scénario LTECV que dans NeutralityV2\_CCSLow. Cela s’explique, ici encore, par l’influence des autres contraintes du scénario LTECV qui baissent le coût marginal du CO<sub>2</sub>.

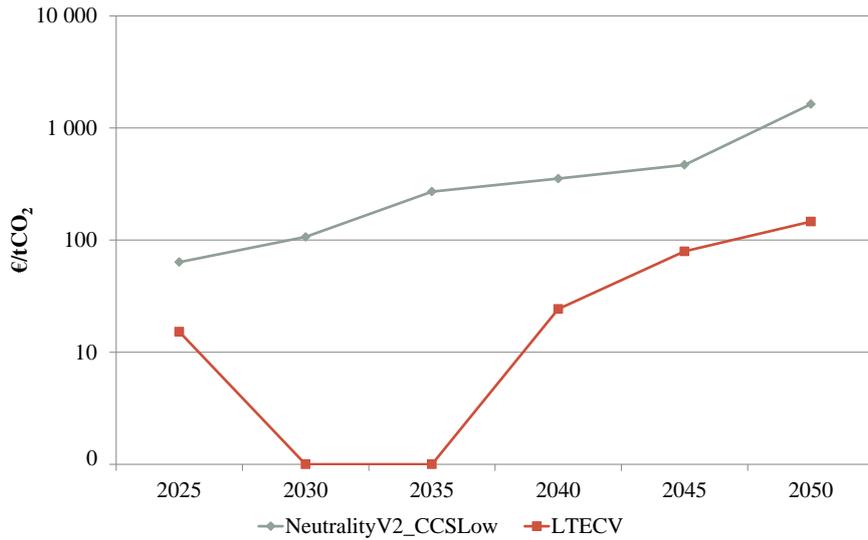


FIGURE 4.21 – Coût marginal du CO<sub>2</sub> dans les scénarios NeutralityV2\_ -CCSLow et LTECV

**Industrie** Dans le scénario LTECV, l'augmentation de la consommation d'énergie finale totale du secteur de l'industrie (voir [Figure 4.22](#)) est limitée à 3 % tandis qu'elle s'élève à 10 % dans un scénario NeutralityV2\_ -CCSLow. La part de l'électricité dans le scénario LTECV reste constante dans le temps, autour de 30 % tandis que dans NeutralityV2\_ -CCSLow, le vecteur électricité atteint 70 % de la consommation d'énergie finale totale en 2050. Par ailleurs, la consommation de biomasse diminue fortement dans l'industrie à cause de la contrainte sur la réduction de la consommation d'énergie finale.

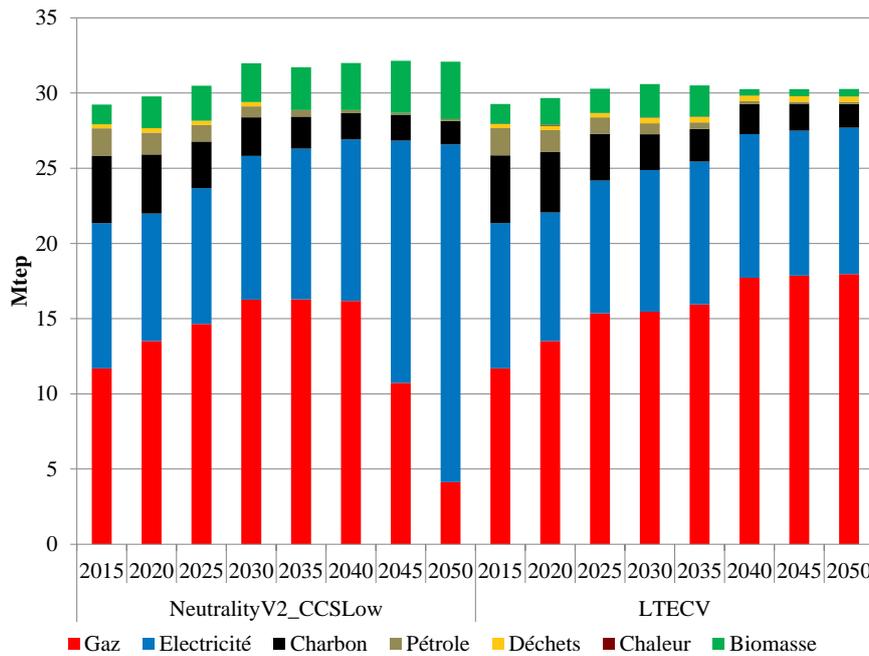


FIGURE 4.22 – Consommation d'énergie finale de l'industrie dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Transport** La consommation d'énergie dans le secteur du transport (voir Figure 4.23) décroît de façon similaire dans les deux scénarios : -32 % dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow et -34 % dans LTECV. L'électrification se développe aussi de façon similaire puisque dans les deux scénarios, le vecteur électrique atteint 26 % et 27 % (NeutralityV2\_CCSLow et LTECV respectivement) de la consommation d'énergie finale. Les biocarburants se développent de façon plus importante dans le scénario LTECV que dans NeutralityV2\_CCSLow. Dans ce dernier cas, le développement de l'utilisation de biométhane permet d'avoir un carburant décarboné qui a l'avantage par rapport au biocarburant classique de permettre de produire des émissions négatives.

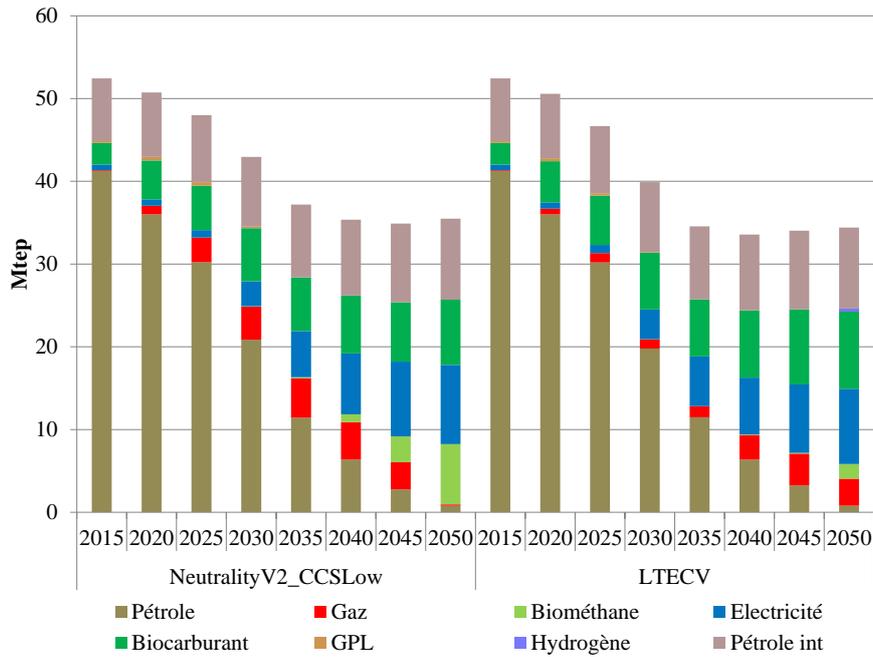


FIGURE 4.23 – Consommation d'énergie finale du transport dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Bâtiments** La diminution de la consommation d'énergie finale dans les secteurs résidentiel et tertiaire atteint 27 % dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow mais près de 47 % dans LTECV (Figure 4.24). En effet, dans ce cas, dans le secteur résidentiel, l'isolation ainsi que les systèmes de chauffage PAC se développent de façon plus importante, ce qui permet de baisser la consommation d'énergie. La part des systèmes de chauffage biomasse décroît au profit de systèmes plus efficaces énergétiquement qui permettent de baisser la consommation d'énergie. Dans le secteur tertiaire, dans le scénario LTECV, la part du pétrole augmente à cause du déploiement de systèmes de chauffage PAC GPL.

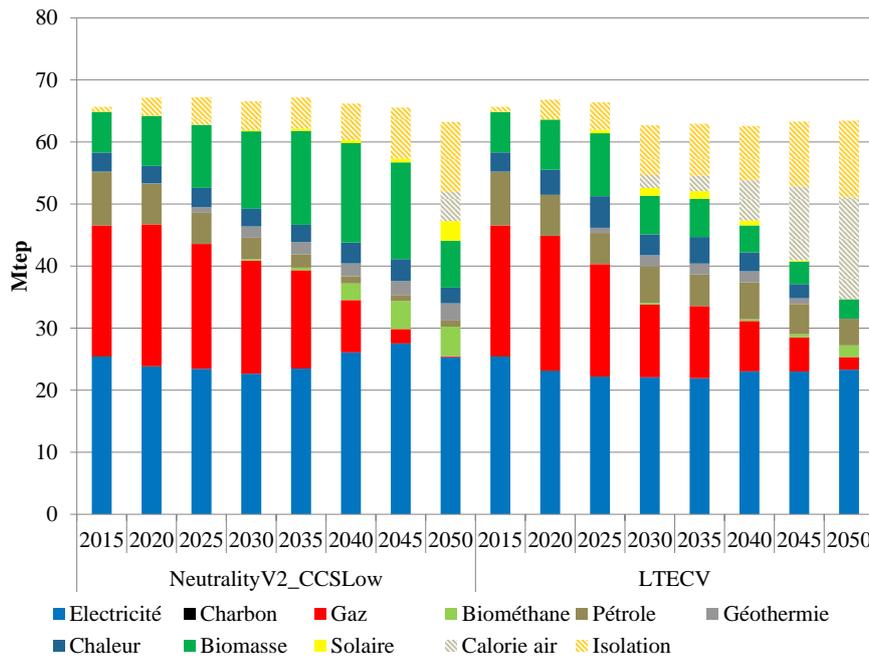


FIGURE 4.24 – Consommation d'énergie finale des bâtiments dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Production d'électricité** L'augmentation des capacités de production d'électricité (voir Figure 4.25) est beaucoup plus importante dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow que dans LTECV (241 GW versus 177 GW). Les capacités BECCS sont par contre plus importantes dans le scénario LTECV (3 GW) que dans NeutralityV2\_CCSLow (0,6 GW). Les capacités photovoltaïques et éoliennes augmentent plus dans ce cas (74 GW et 79 GW respectivement) que dans le scénario LTECV (46 GW et 51 GW respectivement). En définitive, la production d'électricité (Figure 4.26) augmente de 29 % entre 2014 et 2050 dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow alors qu'elle diminue légèrement de 3 % dans LTECV. Enfin, dans les deux scénarios, les centrales nucléaires existantes sont prolongées mais davantage de nouvelles capacités nucléaires sont installées dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow (43 GW) que dans LTECV (30 GW).

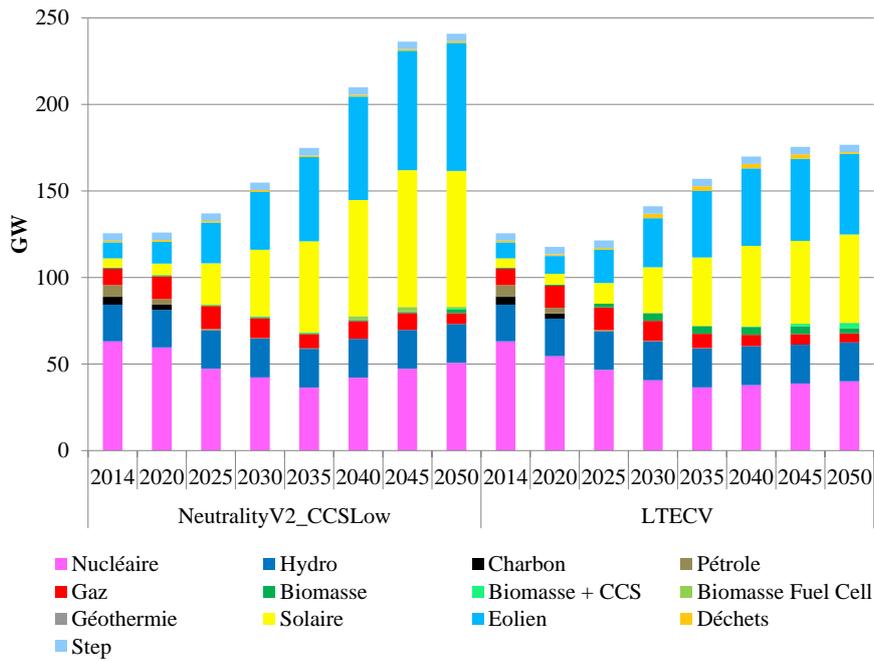


FIGURE 4.25 – Capacités électriques dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

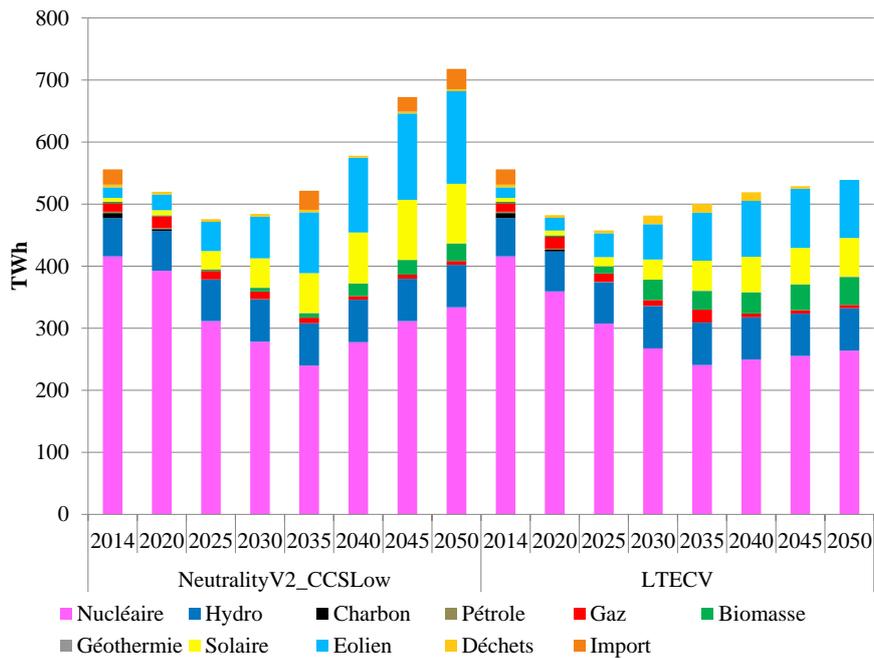


FIGURE 4.26 – Production d’électricité dans les scénarios NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

**Réseaux de chaleur** La production de chaleur reste pratiquement stable entre 2014 et 2050 dans le scénario NeutralityV2\_CCSLow tandis qu’elle croît entre 2014 et 2035 et diminue jusqu’en 2050 dans LTECV. En 2050, l’utilisation des réseaux de chaleur est pratiquement nulle

dans le scénario LTECV car la chaleur est produite à partir de systèmes plus efficaces énergétiquement dans les secteurs du résidentiel et du tertiaire.

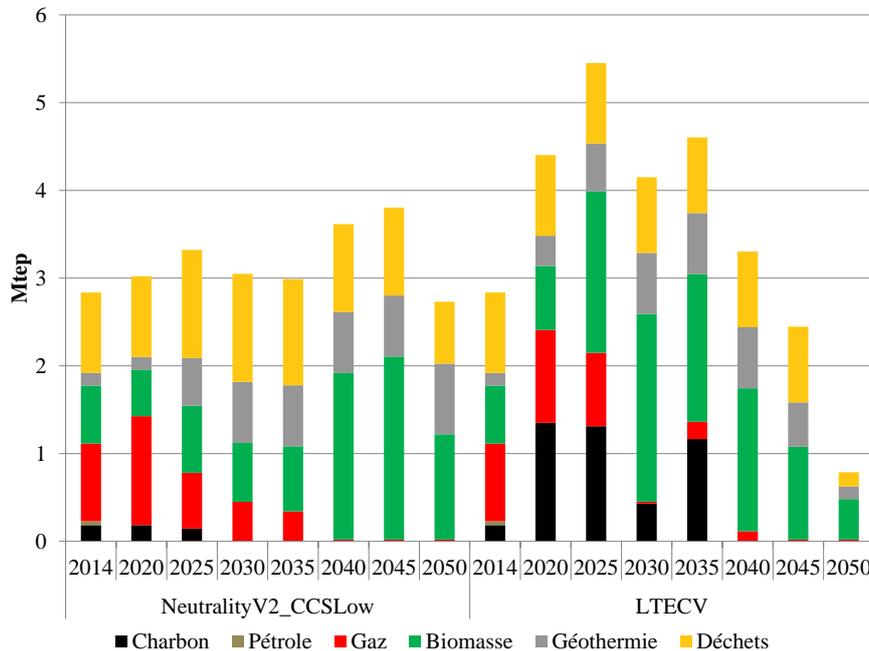


FIGURE 4.27 – Production de chaleur dans les scénarios NeutralityV2\_ - CCSLow et LTECV

#### 4.2.4 Discussion et conclusion

L'étude des scénarios Neutralité réalisés à l'aide du modèle TIMES-France a montré que l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone sera très difficile. L'analyse de sensibilité autour de la disponibilité de certaines technologies comme le CCS ou le nucléaire indique que dans un scénario où l'on ne peut recourir à ces options, la faisabilité des scénarios est compromise. Par ailleurs, le scénario NeutralityV2\_ - CCSLow repose sur des hypothèses parfois très optimistes, comme l'électrification de l'industrie à près de 70 %, qu'il faudrait nuancer.

L'étude comparée entre un scénario respectant les objectifs de la loi (LTECV) et un scénario contraint d'atteindre la neutralité carbone (NeutralityV2\_ - CCSLow) montre que les trajectoires technologiques sous-jacentes sont différentes, ce qui souligne la nécessité d'avoir un cadre prospectif cohérent pour guider la transition du système énergétique et accompagner l'action publique. Ainsi, l'électrification est beaucoup plus importante dans le cas d'un scénario neutralité carbone que dans LTECV, ce qui implique une évolution très contrastée du système électrique. Le développement des émissions négatives se produit différemment, leur introduction débute plus tôt dans NeutralityV2\_ - CCSLow et leurs sources sont davantage diversifiées puisqu'elles re-

posent sur les capacités BECCS mais aussi sur l'épuration du biogaz. Par conséquent, l'usage de la biomasse ne se répartit pas de la même façon dans les secteurs (voir Annexe F). En outre, l'impossibilité pour le modèle de satisfaire la contrainte de réduction de la consommation d'énergie finale telle que stipulée par la loi, c'est-à-dire une réduction de 50 % en 2050 par rapport à 2012, montre qu'il faudra probablement envisager des demandes de service énergétique plus basses que celles actuellement envisagées afin de s'engager sur une trajectoire de type LTECV. Ceci ne peut se faire sans une véritable réflexion autour de l'évolution des modes de vie et de la croissance associée et passe par une implication et donc un dialogue avec les citoyens pour pouvoir accompagner ces changements et informer sur les choix technologiques.

Les objectifs de la loi (neutralité carbone du Plan Climat ou LTECV) semblent donc très ambitieux. Des modifications importantes devront avoir lieu dans chacun des secteurs du système énergétique pour respecter les différentes contraintes. La question de l'acceptabilité sociale concernant la disponibilité du CCS, la saturation du parc éolien, la construction ou la prolongation de centrales nucléaires existantes sont autant de facteurs d'incertitudes. Enfin, le recours aux technologies associées aux émissions négatives est encore controversé et leur indisponibilité pourrait, de ce fait, empêcher la réalisation de l'objectif de neutralité carbone. Par exemple, les investissements de R&D en France concernant ces technologies ne conduisent pas à des prototypes permettant de valider le passage à l'échelle des hypothèses envisagées. Enfin, une dernière incertitude concerne la disponibilité de la biomasse : l'utilisation de bois-énergie de manière plus poussée pourrait poser des questions en termes d'impact sur la biodiversité alors que cette ressource semble clé dans l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone permettant entre autres de décarboner une partie du secteur des transports et de réaliser des émissions négatives.

Toutes les trajectoires proposées dans le cadre de notre modélisation reposent sur des systèmes énergétiques différents. Ces propositions font l'objet de limites que nous avons évoquées (planificateur omniscient, représentation des infrastructures limitée, évolution des coûts des technologies, acceptabilité sociale, etc.). Elles reflètent les inerties que le modèle a pu intégrer, par exemple en incorporant des contraintes sur les nouvelles capacités ou sur l'évolution des parts des énergies. Mais au-delà de ces inerties, l'influence des décisions politiques passées sur la structure actuelle du système énergétique est primordiale. Elle peut conduire par exemple au phénomène de *carbon lock-in*. Aussi, afin de mieux comprendre les potentialités de transition d'un système énergétique vers sa version décarbonée, il nous semble pertinent de revenir sur les cas de la Suède et de la France, deux pays aux ressources et structures énergétiques similaires mais qui ont mis en place des politiques publiques différentes. Cette exploration nous

permettra de souligner l'influence des choix passés sur l'évolution future de leurs systèmes énergétiques.

#### 4.3 LE POIDS DES DÉCISIONS PASSÉES : ENSEIGNEMENT D'UNE ANALYSE COMPARATIVE AVEC LA SUÈDE

Comme nous l'avons vu précédemment, la transition énergétique ne se produira pas spontanément et nécessitera l'intervention de gouvernements (FOUQUET, 2012). La transition actuelle se heurte à de nombreux obstacles, tels que l'inertie des technologies et des infrastructures, la compétitivité économique des technologies des énergies renouvelables (du moins ces dernières décennies<sup>19</sup>), le niveau d'investissement requis, etc. Outre la modification des technologies et des énergies utilisées, la transition énergétique doit également impliquer un changement de comportement des consommateurs (notamment dans le secteur des transports et du résidentiel). Les politiques publiques telles que les taxes, les subventions, la réglementation et l'information ont joué un rôle important dans la formation du système énergétique. Il est donc nécessaire de comprendre les déterminants clés de ces politiques lors de l'étude de la transition énergétique.

Une approche originale de la transition énergétique bas-carbone consiste à comparer la transition énergétique mise en œuvre dans différents pays qui ont réduit leurs émissions de carbone et leur dépendance aux combustibles fossiles, et à comprendre les éléments clés qui ont conduit à ces évolutions. Des études comparatives de pays ont récemment été menées, en mettant l'accent sur le secteur de l'électricité (GEELS, KERN et al., 2016; CHERP et al., 2017) ou sur le système de gouvernance (LAES, GORISSEN et NEVENS, 2014), mais elles n'analysent pas le système énergétique dans son ensemble. De plus, à notre connaissance, aucune comparaison entre la France et la Suède n'a été publiée, bien que certains rapports français analysent le succès de la transition énergétique suédoise (BOURDU, 2013; CRUCIANI, 2016; RÜDINGER, 2014). La Suède, qui a réussi à réduire ses émissions CO<sub>2</sub> tout en maintenant sa croissance économique, semble être un repère intéressant par rapport à la France car les deux pays présentent certaines similitudes, comme une part élevée de production nucléaire et hydraulique dans la production d'électricité et un gisement élevé de biomasse.

De plus, les deux pays se sont récemment engagés à atteindre des objectifs ambitieux en ce qui concerne leurs émissions : ils font partie des premiers pays d'Europe à s'être engagés à atteindre la neutralité carbone. Comme nous l'avons déjà mentionné, la France a annoncé dans le Plan Climat un objectif de neutralité carbone à l'horizon

---

19. Le coût des énergies renouvelables comme le PV et l'éolien ont significativement baissé depuis 2010 et peuvent, dans certaines conditions, entrer en compétition avec les énergies fossiles (IRENA, 2019).

2050 qui ne fait pas encore partie de la législation, ce qui le rendrait plus contraignant. En 2016, les principaux partis suédois ont signé un accord de politique climatique prévoyant un objectif d'émissions nettes nulles pour les GES en 2045. L'objectif *net* est défini comme une réduction des émissions nationales d'au moins 85 % par rapport à 1990 (SOU 2016 :47, 2016); les 15 % restants peuvent être obtenus via des réductions d'émissions à l'étranger, l'utilisation de bioénergie avec du CCS (BECCS) ou l'absorption de CO<sub>2</sub> grâce au secteur UTCATF. Tout en réduisant leurs émissions, les deux pays souhaitent réduire leur dépendance au nucléaire : alors que la France s'est engagée à réduire à 50 % sa part du nucléaire dans la production d'énergie en 2035, la Suède vise un objectif de 100 % d'énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité en 2040 (SWEDISH GOVERNMENT, 2016).

L'objectif de cette étude, menée en collaboration avec Anna Krook-Riekkola de l'université de Luleå en Suède est d'identifier des éléments susceptibles de conduire la transition énergétique vers un objectif de neutralité carbone. Pour ce faire, nous proposons d'abord de comparer les transitions énergétiques passées en France et en Suède, deux pays qui ont considérablement diminué leurs émissions de GES et leur dépendance aux combustibles fossiles depuis 1970. Pour évaluer les impacts de l'inertie du système énergétique actuel sur la faisabilité de la neutralité carbone, nous comparons l'évolution des systèmes énergétiques grâce à des modèles TIMES, TIMES-France et TIMES-Sweden. Comme souligné précédemment, si notre analyse se concentre principalement sur le système énergétique, c'est qu'il est le principal émetteur d'émissions de GES et en particulier de CO<sub>2</sub>. Nous nous limitons donc à la comparaison des politiques publiques relatives au système énergétique et à l'analyse de ce dernier. Ainsi, nous décryptons la situation actuelle dans les deux pays et examinons le passé pour comprendre en quoi les trajectoires de la France et de la Suède sont si différentes depuis les années 1970, bien que les deux pays aient investi dans le nucléaire neutre en carbone. Nous utilisons ensuite les modèles TIMES des deux pays pour analyser les impacts des évolutions passées sur la faisabilité de la neutralité carbone pour les deux systèmes énergétiques. Ces analyses nous conduisent à identifier les éléments importants pour une transition énergétique vers la neutralité carbone.

#### 4.3.1 *La politique énergétique en Suède*

Le point de départ de notre étude comparative est 1970. Trois ans plus tard survient le premier choc pétrolier, entraînant une hausse importante des prix du pétrole. Cet événement déclenche une évolution significative des politiques énergétiques qui influence encore aujourd'hui la structure du système énergétique en France et en Suède.

Ces deux pays partagent plusieurs points communs. Pays développés de l'UE avec une économie de marché avancée, ils sont considérés comme des États-providence. En 1970, les deux pays sont fortement dépendants des combustibles fossiles et en particulier du pétrole : aucun des deux pays ne possède de réserves de pétrole et ils dépendent des importations. Leurs émissions par habitant sont élevées (environ 8,5 tCO<sub>2</sub>/habitant en France et 11,5 tCO<sub>2</sub>/habitant en Suède), mais ils réussissent tous deux à les réduire et ont maintenant des émissions par habitant parmi les plus faibles d'Europe (voir [Tableau 4.20](#)), principalement grâce à leur électricité faiblement carbonée. En outre, ils disposent d'un potentiel de biomasse important, provenant de l'agriculture et des forêts en France et principalement des forêts en Suède. La France est le deuxième plus gros consommateur de biomasse solide à des fins énergétiques dans l'UE, tandis que la Suède est le troisième (EUROSTAT, 2018). Ces caractéristiques communes soulignent d'autant plus les différences qui ont conduit à la situation actuelle des deux pays. Dans un premier temps, nous analysons l'évolution des deux systèmes énergétiques avant de présenter les principaux moteurs de leurs transformations.

#### 4.3.1.1 Une évolution contrastée des systèmes énergétiques

En 1970, la situation des systèmes énergétiques suédois et français est très similaire car ils dépendent fortement des combustibles fossiles. Leur part s'élève en France à 89 % contre 80 % en Suède (voir [Figure 4.28](#)). La Suède a toutefois une faible consommation de charbon (4 %) par rapport à la France (23 %) qui possède quelques ressources charbonnières et les utilise dans plusieurs secteurs : industrie, électricité et bâtiments. En Suède, la consommation de charbon se limite principalement au secteur industriel avec une part résiduelle allouée à la production d'électricité. Dans les deux pays, le pétrole est utilisé largement, dans tous les secteurs et doit être importé. La principale différence concernant les combustibles fossiles réside dans la consommation de gaz : la Suède n'en utilise pas, alors que la France a développé un réseau et produit une partie de sa consommation. La France a donc un portefeuille plus diversifié d'énergies fossiles que la Suède qui dépend majoritairement du pétrole. Cette situation s'explique principalement par la présence de ressources énergétiques en France (charbon et gaz) à la différence de la Suède. Concernant les autres vecteurs énergétiques, les deux pays ont construit de nombreuses centrales hydrauliques après la Seconde Guerre mondiale et ont tiré parti de leur potentiel de biomasse. Bien que la part de cette dernière dans la consommation d'énergie finale soit plus importante en Suède, la France en utilise deux fois plus en valeur absolue (12 % soit 3,9 Mtep en Suède contre 8 % soit 8,7 Mtep en France).

De 1970 à 2015, la consommation d'énergie primaire augmente dans les deux pays, de 74 % en France et de 24 % seulement en Suède

TABLE 4.20 – Indicateurs économiques et émissions pour la France, la Suède et l'UE

INDICATEURS	MOYENNE UE		FRANCE		SUÈDE	
	1990	2016	1990	2016	1990	2016
Population [Milliers]	475 188	510 277	58 227	66 730	8 527	9 851
<i>Croissance</i>		7 %		15 %		16 %
PIB [Md€ 2010]	8 988	13 825	1 440	2 122	243	423
PIB/habitant	19	27	25	32	28	43
<i>Croissance</i>		43 %		29 %		51 %
Énergie finale par habitant [Mtep/hab.]	2,3	2,2	2,3	2,2	3,7	3,3
Énergie primaire par habitant [Mtep/hab.]	3,5	3,2	3,9	3,7	5,6	5,0
CO <sub>2</sub> liées à la combustion des énergies	4 126	3 234	363	315	52	37
<i>Croissance</i>		-22 %		-13 %		-29 %
CO <sub>2</sub> par habitant (système énergétique) [kgCO <sub>2</sub> /hab.]	8,7	6,3	6,2	4,7	6,1	3,7
Émissions CO <sub>2</sub> (aviation internationale incluse)	4 545	3 637	407	357	59	45
<i>Croissance</i>		-20 %		-12 %		-23 %
Émissions CO <sub>2</sub> par habitant [kgCO <sub>2</sub> /hab.]	9,6	7,1	7,0	5,4	6,9	4,6
Émissions GES (aviation internationale incluse)	5 720	4 441	555	475	73	55
<i>Croissance</i>		-22 %		-14 %		-24 %
Émissions GES par habitant [kgCO <sub>2</sub> /hab.]	12,0	8,7	9,5	7,1	8,5	5,6

(voir [Figure 4.28](#)). Toutefois, la consommation d'énergie primaire par habitant reste stable en France entre 1990 et 2015, à environ 3,9 Mtep/habitant, alors qu'elle diminue en Suède de 5,5 à 4,6 Mtep/habitant. En outre, la Suède réussit à réduire ses émissions liées à la consommation d'énergie de près de 30 % entre 1990 et 2016 (de 24 % pour le total de ses émissions), tandis que son PIB augmente de 75 %. En revanche, la France ne réduit ses émissions liées à consommation d'énergie que de 13 % (de 14 % pour le total de ses émissions), tandis que son PIB augmente de 47 %.

Au cours de la même période, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire diminue dans les deux pays et s'élève en 2015 à 47 % en France et 27 % en Suède. Tandis que l'utilisation du charbon diminue en France, particulièrement dans le secteur de l'électricité, sa part en Suède reste stable autour de 5 % depuis 1970. La consommation de charbon dans les réseaux de chaleur a légèrement augmenté autour de 1985 mais a ensuite été remplacée par de la biomasse. Il est principalement utilisé aujourd'hui dans le secteur de la sidérurgie et marginalement pour la production d'électricité et de chaleur. La Suède a également réussi à réduire de manière significative sa consommation de pétrole, en particulier dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment et après le second choc pétrolier en 1979, ce dernier ayant eu un impact économique important sur le pays. En France, la consommation de pétrole est restée relativement stable car la baisse dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment a été compensée par une augmentation dans le secteur des transports. L'évolution du gaz est plus contrastée. Contrairement à la France, la Suède n'a pas développé de dépendance au gaz puisque sa part dans la consommation d'énergie finale (voir [Figure 4.29](#)) est restée faible (2 % contre 20 % en France en 2015). En effet, la Suède a commencé à développer un petit réseau à partir de 1985 mais celui-ci s'est limité à certaines villes du sud (MEYER, 2017c). Le gaz est principalement utilisé dans les secteurs de l'industrie, de l'électricité et du chauffage.

La part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale est restée plus élevée en Suède (15 % en 1970 et 34 % en 2015) qu'en France (9 % en 1970 et 26 % en 2015) bien que son augmentation ait été plus importante en France. Dans les deux pays, la consommation d'électricité d'origine nucléaire a crû fortement à partir de 1970 avec le déploiement de parcs de centrales nucléaires et atteint près de 36 % de la consommation d'énergie primaire en 1990. Les deux pays disposent en outre de nombreuses centrales hydroélectriques. Leur production est restée constante en France, alors qu'en Suède elle a augmenté dans les années 1970 et s'est stabilisée depuis 1985. En plus des autres sources d'énergies renouvelables, la production d'électricité en France et en Suède est ainsi décarbonée respectivement à près de 93 et 99 % en 2015. L'ensemble du nucléaire et de l'hydroélectricité représente

47 % et 46 % de la consommation d'énergie primaire respectivement en France et en Suède.

L'évolution la plus notable du système énergétique suédois est l'augmentation de l'utilisation de bioénergies. La part des énergies renouvelables et des déchets dans la consommation d'énergie primaire est passée de 10 à 25 % en Suède entre 1970 et 2015, tandis que la part en France a légèrement augmenté, passant de 6 à 7 %. La croissance suédoise s'explique principalement par l'augmentation de 118 % de l'utilisation de biomasse depuis 1990, tandis qu'en France, la production de biomasse n'a augmenté que de 33 %. Cependant, en valeur absolue, la Suède continue de consommer moins de biomasse (11,6 Mtep) que la France (13,1 Mtep). L'utilisation de bioénergies dans le secteur industriel en Suède est particulièrement importante depuis les années 1970, à la différence de la France. En outre, depuis 1990, sa consommation dans les réseaux de chaleur et pour la production d'électricité a fortement augmenté. Grâce au développement du chauffage électrique et des réseaux de chaleur, le pays a d'ailleurs pratiquement décarboné le secteur des bâtiments.

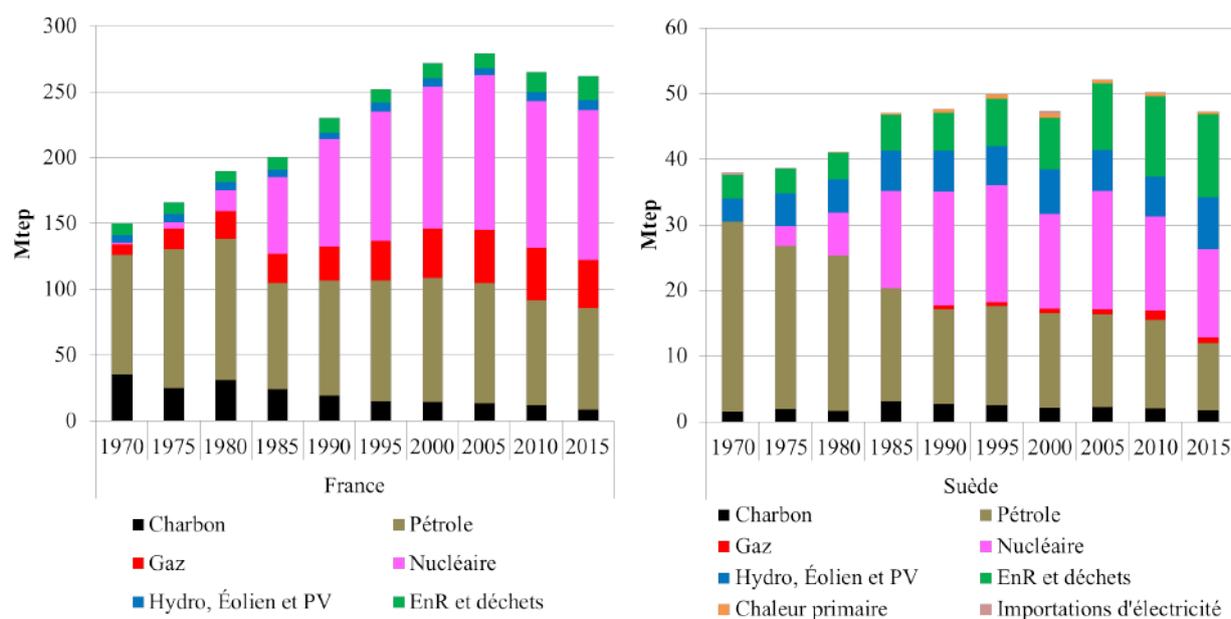


FIGURE 4.28 – Consommation d'énergie primaire en France et en Suède

Source : Agence suédoise de l'énergie et SDES (2019a)

Pour conclure ce rapide survol de l'évolution des systèmes énergétiques français et suédois, nous pouvons tout d'abord souligner que le mix énergétique s'est davantage diversifié depuis les années 1970 en Suède qu'en France. Alors que les principales évolutions du système énergétique français sont l'augmentation de la consommation de gaz et le développement de l'énergie nucléaire, la Suède a réussi à augmenter non seulement sa production d'électricité avec le

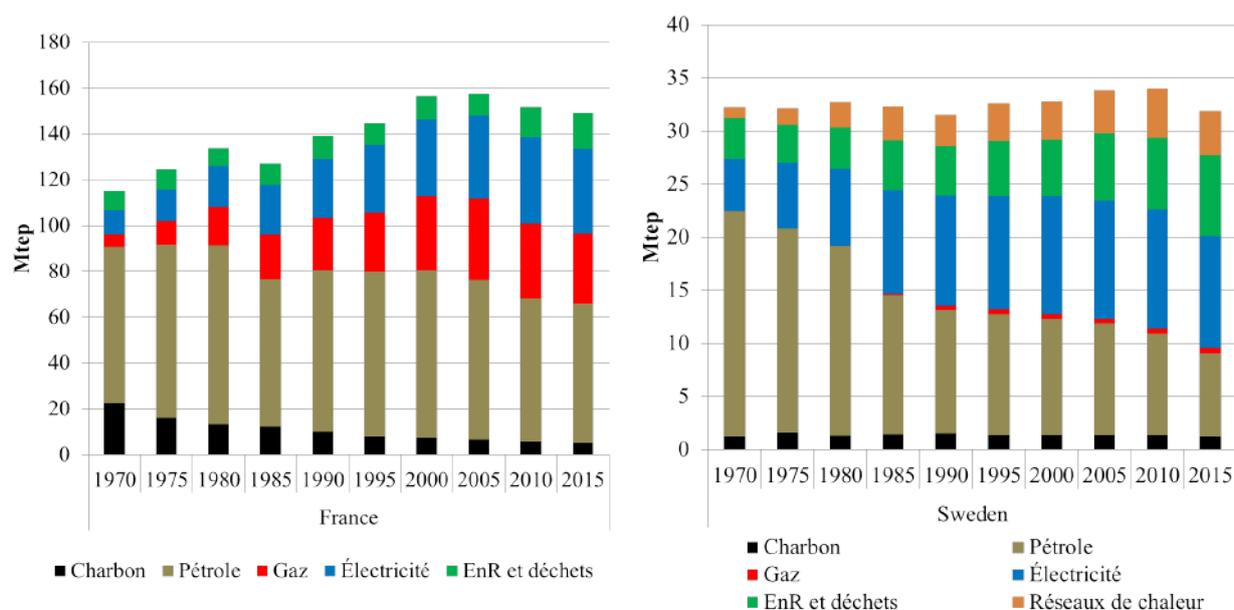


FIGURE 4.29 – Consommation d'énergie finale en France et en Suède

Source : Agence suédoise de l'énergie et SDES (2019a)

développement de l'énergie nucléaire (moins prononcé qu'en France), mais aussi sa consommation de biomasse tout en diminuant celle du pétrole. La Suède semble finalement être allée plus loin dans la transformation de son système énergétique : forte électrification, en particulier dans les secteurs industriels et résidentiels ; consommation importante de biomasse, en particulier dans le secteur industriel ; utilisation de pétrole principalement limitée au secteur des transports ; réduction de sa consommation énergétique finale par habitant (de 3,7 en 1990 à 3,3 Mtep/habitant en 2016). Il faut remonter aux principales politiques publiques mises en place dans chaque pays pour expliquer les différences actuelles.

#### 4.3.1.2 Des mesures multiples pour un leadership suédois

La Suède s'est efforcée d'être un leader et un chef de file en matière d'environnement et de climat depuis les années 1970 (MATTI, 2009). En 1972, le pays a ainsi accueilli la Conférence de Stockholm qui marque un tournant dans la prise en compte des questions environnementales sur la scène internationale. Comme Pujade, le premier ministre français de l'Environnement de l'époque, le déclare : « La Suède passait pour le meilleur exemple en matière d'environnement » (POUJADE et FRIOUX, 2012). Dès 1988, les premiers objectifs climatiques du pays ont été adoptés (SWEDISH GOVERNMENT, 1987) et visaient à stabiliser les émissions CO<sub>2</sub>. Ses objectifs climatiques les plus récents figurent parmi les plus ambitieux des pays développés : un système électrique composé à 100 % d'EnR en 2040 ainsi que la neutralité carbone en 2045

en permettant toutefois l'utilisation de crédits internationaux (SOU 2016 :47, 2016). Pour les émissions de GES nationales, cela signifie que la Suède s'est engagée à les réduire de 85 % en 2045 par rapport à 1990.

Le pays ne possède pas de ressources nationales en énergies fossiles et a particulièrement souffert de sa dépendance vis-à-vis des importations de pétrole et de charbon durant la Seconde Guerre mondiale, période pendant laquelle il a dû importer du charbon d'Allemagne. Comme en France, la recherche sur l'énergie nucléaire débute après la guerre avec la création d'Atomenergi AB en 1947. L'État est avant tout préoccupé par son indépendance énergétique (KAJISER et HÖGSELIUS, 2019), mais considère également le nucléaire comme un outil de *soft power* dans la région Baltique, grâce aux exportations de l'électricité nucléaire (MEYER, 2017b). Les industries suédoises, en particulier les industries grandes consommatrices d'énergie, soutiennent également ce programme car elles le considèrent comme un moyen d'accéder à une électricité à bas coût. Le développement de l'énergie nucléaire commence en 1970 avec la construction de la centrale nucléaire de Ringhals qui ouvre en 1972. Le choix de l'énergie nucléaire est ensuite confirmé et renforcé par le choc pétrolier de 1973. Au total, douze centrales nucléaires sont construites jusqu'en 1985.

L'accident de Three Miles Island<sup>20</sup> en 1979 suscite toutefois des inquiétudes parmi la population en matière de sécurité. Depuis lors, un objectif de sortie du nucléaire est régulièrement annoncé mais sa mise en œuvre est toujours modifiée, reportée ou annulée, même si la majorité des différents partis politiques suédois sont d'accord pour éviter le recours à l'énergie nucléaire. Par exemple, bien que la construction de nouvelles centrales nucléaires ait été interdite en 1984 avec la loi sur les activités nucléaires (MICHANEK et SÖDERHOLM, 2009), le gouvernement a réussi à contourner l'interdiction en permettant aux entreprises d'augmenter la puissance des centrales existantes (MEYER, 2017a). Plus récemment, dans les années 2000, quatre réacteurs ont été fermés. La dernière annonce concernant la sortie du nucléaire a été faite en 2016 avec l'objectif d'un système électrique fonctionnant avec 100 % d'énergies renouvelables en 2040, bien qu'il ne soit pas précisé d'échéance pour l'élimination ou l'interdiction de l'énergie nucléaire.

Comparée à la France, la Suède utilise depuis longtemps de la bioénergie. Même après son industrialisation au 19<sup>ème</sup> siècle, la part de la biomasse dans la consommation d'énergie était encore élevée (près de 40 % en Suède en 1900 contre 10 % en France) (GALES et al., 2007). Après la Seconde Guerre mondiale, la Suède a diminué la part de biomasse et augmenté celle de pétrole. Le choc pétrolier a donc eu un impact considérable sur le système économique (BJÖRHEDEN,

20. L'accident de la centrale nucléaire de Three Mile Island qui s'est produit en 1979 aux États-Unis est le premier incident grave de l'industrie et a marqué un tournant dans la perception du nucléaire par l'opinion publique dans beaucoup de pays.

2006). Parallèlement au développement de l'énergie nucléaire, des programmes de recherche sur la bioénergie sont donc lancés afin de réduire la dépendance du pays au pétrole (JOHANSSON et al., 2002), à l'instar du programme de recherche *Whole Tree Utilization* (1974-1977). Ces programmes permettent d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts des combustibles forestiers grâce à la rationalisation et au *learning by doing* (BJÖRHEDEN, 2006). Face aux préoccupations environnementales croissantes, le développement de la bioénergie n'est plus uniquement motivé par l'objectif d'éviter les importations d'énergies fossiles, mais également par la volonté de sortir progressivement du nucléaire (BJÖRHEDEN, 2006). En outre, les mesures visant au développement du bois sont soutenues par les municipalités et les industries de la foresterie et des pâtes et papiers qui y voient un moyen de développer le marché de la biomasse (ERICSSON et WERNER, 2016). Tous les programmes de recherche, incitations fiscales et subventions mis en place ont ainsi bénéficié d'un soutien politique continu et constant (ANDERSSON, 2012; ERICSSON, HUTTUNEN et al., 2004), ce qui a entraîné une augmentation impressionnante de l'utilisation de la biomasse de plus de 200 % entre 1970 et 2016, selon l'Agence suédoise de l'énergie (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2018).

De plus, cette augmentation de la consommation de biomasse a été rendue possible par deux autres facteurs. Premièrement, l'existence de nombreux réseaux de chaleur utilisant principalement du charbon et pouvant facilement se convertir à la biomasse. Le développement du chauffage urbain a été favorisé par le programme Million Homes (1965-1974) mis en place pour remédier à la pénurie de logements en Suède (ERICSSON et WERNER, 2016; DI LUCIA et ERICSSON, 2014). Après les chocs pétroliers, ces systèmes sont passés au charbon, avec l'aide de différentes incitations (subventions notamment), puis à la biomasse dans les années 1990, ce qui a rendu le secteur résidentiel presque neutre en carbone avec une consommation très faible d'énergies fossiles. Secondement, l'introduction d'une taxe carbone en 1991 a rendu la biomasse très compétitive. Cette taxe a fait partie d'une réforme fiscale majeure qui a notamment étendu la taxe sur la valeur ajoutée aux consommations d'énergie et réduit les taxes sur le travail tout en maintenant une pression fiscale constante. Cette transformation du système fiscal visait à améliorer la compétitivité des entreprises suédoises tout en préservant le modèle de protection sociale (BOURDU, 2013). Ce nouveau système de taxation pèse en effet davantage sur les consommateurs que sur le secteur privé. Outre les taxes sur l'énergie, le gouvernement considère ainsi que la taxe carbone a eu un rôle clé dans la réduction des émissions CO<sub>2</sub> tout en maintenant la croissance économique.

Influencée par la modernisation écologique, la Suède compte également beaucoup sur les innovations, considérées comme un moyen de relever le défi du changement climatique (MEYER, 2017b). Cette

confiance dans l'innovation était déjà présente dans les années 1970 lorsque les industries et l'État ont collaboré pour investir dans de nouvelles solutions visant à améliorer l'indépendance énergétique. Les industries étaient désireuses de participer à ces programmes qui augmentaient l'efficacité énergétique afin de devenir des pionnières dans le développement de nouvelles solutions (BERGQUIST et SÖDERHOLM, 2016). Elles les ont considérées comme un moyen d'améliorer la compétitivité et la croissance.

En Suède, la politique énergétique repose donc sur un ensemble équilibré de différentes politiques publiques. Parallèlement au développement de l'énergie nucléaire encouragé pour des raisons d'indépendance énergétique mais aussi de compétitivité, la Suède a développé l'utilisation de la biomasse et soutenu le chauffage urbain. Bien que les politiques aient été conçues à l'origine pour réduire la consommation de pétrole, elles se sont également révélées efficaces pour réduire les émissions CO<sub>2</sub> lorsque les préoccupations environnementales sont apparues. La biomasse a ainsi pu jouer un rôle important dans le système énergétique suédois grâce à une politique énergétique cohérente.

L'organisation institutionnelle a également contribué au succès de la politique énergétique en Suède. Après le premier choc pétrolier en 1973, afin de réduire la consommation de pétrole dans le pays, le gouvernement adopte en 1977 une loi créant une planification énergétique pour les municipalités ainsi que des services de conseil en énergie aux ménages (KJEANG, PALM et VENKATESH, 2017). Malgré son rôle fluctuant dans le temps, cet outil politique souligne l'importance des municipalités et des régions dans la mise en œuvre des politiques publiques en Suède. En fait, l'établissement d'un modèle d'État providence et ses arrangements institutionnels ont joué un rôle clé dans la transformation du système énergétique suédois (WESTHOLM et BELAND LINDAHL, 2012). Bien que ce modèle n'ait pas été conçu initialement pour ce type de politique énergétique, son évolution dans les années 1980 avec la « combinaison de politiques de protection sociale et de concurrence » a rendu la transition possible. L'élaboration de politiques publiques en Suède est ainsi connue pour être pragmatique, rationaliste et consensuelle, notamment grâce au dialogue continu qui se déroule dans les commissions gouvernementales entre les différentes parties prenantes (BERGH et ERLINGSSON, 2009). Par exemple, la société et les industries ont largement approuvé la transformation de son système fiscal grâce à la culture suédoise de dialogue et de consensus. Ce soutien a été décisif dans les différentes transitions énergétiques que la Suède a menées.

#### 4.3.1.3 *Les leçons des transitions énergétiques passées*

Bien que la France et la Suède aient des systèmes énergétiques similaires dans les années 1970, les politiques publiques mises en place conduisent au suivi de différentes trajectoires entre les deux pays avec

une diversification des énergies n'émettant pas de CO<sub>2</sub> plus marquée en Suède. Ainsi, en France, l'augmentation de la consommation de gaz, une électrification de l'industrie moins importante, la consommation de fossiles dans les bâtiments ainsi que le peu de soutien au développement de la bioénergie conduit à un système énergétique plus dépendant des énergies fossiles qu'en Suède (47 % en France contre 27 % en Suède de la consommation d'énergie primaire).

Les caractéristiques initiales d'un système énergétique jouent un rôle crucial car elles influencent son évolution et peuvent générer une inertie considérable (UNRUH, 2000). La disponibilité des ressources ainsi que des motivations géostratégiques ont une influence sur les évolutions des systèmes énergétiques : la découverte d'un gisement de gaz en France a entraîné le développement d'un réseau gazier, puis son expansion, malgré la nécessité de recourir à des importations. La Suède, qui n'a jamais eu de ressources en gaz, a développé son réseau beaucoup plus tard et uniquement dans le sud. Les deux pays ont dû importer toute leur consommation de pétrole. Les chocs pétroliers, notamment celui de 1979, ont remis en cause ce modèle. En réaction à cet événement, les deux pays ont réussi à réduire leur consommation de pétrole, mais de manière différente. Bien que les deux pays aient choisi de développer l'énergie nucléaire pour renforcer leur indépendance énergétique, la Suède a également étendu les réseaux de chaleur, tandis que la France a renforcé la consommation d'électricité dans son secteur résidentiel. La Suède a encouragé la recherche sur la bioénergie et l'utilisation de la biomasse et a réussi à augmenter sa consommation plus rapidement qu'en France grâce à des mesures cohérentes.

Les politiques publiques adoptées ont ainsi réussi à mettre en œuvre des transitions énergétiques dans les deux pays, notamment celle du nucléaire dans la production d'électricité. La Suède a également mené une autre transition énergétique dans le secteur du chauffage avec une forte diminution de la consommation de pétrole dans les secteurs des bâtiments et un développement des réseaux de chaleur, principalement alimentés par la biomasse. Sans l'impulsion de différentes mesures mises en place dans chaque pays, ces transitions énergétiques n'auraient pas eu lieu. Les politiques publiques constituent donc un outil important pour la transition énergétique.

Les préoccupations environnementales croissantes à la fin des années 1980 ont entraîné un tournant dans la politique énergétique suédoise. À la faveur d'une crise économique majeure qui a frappé les pays nordiques au début des années 1990, la Suède a modifié son système fiscal et introduit une taxe sur le carbone en 1991 qui encourage l'utilisation de la bioénergie, notamment dans les réseaux de chaleur. La Suède est en effet marquée par une vision plus environnementaliste et a souligné plus tôt le rôle potentiel des énergies renouvelables. Au même moment, la France était réticente à adopter des mesures

potentiellement coûteuses (VIRLOUVET, 2015). Le succès de la politique climatique suédoise est également soutenu par la vision à long terme de son gouvernement et favorisé par une culture de consensus et de dialogue. Ceci est illustré une nouvelle fois par l'accord conclu en juin 2016 entre l'opposition et les partis majoritaires, qui vise à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2045. À l'instar de la Suède, la France se targue d'être un leader sur la scène climatique internationale et a récemment annoncé l'adoption d'un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Cependant, jusqu'à récemment, la France ne disposait pas de politiques publiques fortes visant à modifier son système énergétique. Par ailleurs, les deux pays devront clarifier à l'avenir leur politique énergétique en matière d'énergie nucléaire dont le futur est incertain malgré son rôle important aujourd'hui : la Suède vise un système d'électricité 100 % renouvelable d'ici 2040 sans interdire l'énergie nucléaire, alors que l'objectif français de 50 % d'ici 2025 a été reporté à 2035 et sans calendrier précis.

#### 4.3.2 *Les futures trajectoires des systèmes énergétiques*

Pour analyser l'évolution future des systèmes énergétiques français et suédois vers la neutralité carbone, nous allons comparer les résultats de modèles d'optimisation TIMES développés pour chacun des deux pays. Chaque modèle permet de souligner les défis associés aux trajectoires vers la neutralité carbone dans chaque secteur du système énergétique.

##### 4.3.2.1 *Hypothèses de l'exercice prospectif*

La version française TIMES-France et la version suédoise TIMES-Sweden ont toutes deux la même structure principale. Celle-ci est dérivée du projet RES2020 (2009) et a été adaptée à chaque contexte national pour tenir compte des spécificités des pays (voir KROOK-RIEKKOLA (2015) pour la Suède, et l'Annexe A du présent manuscrit ainsi que ASSOUMOU (2006) pour la France). Les deux modèles représentent explicitement les émissions CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergie.

Les prix des énergies sont spécifiés de manière exogène et sont dérivés du scénario *New policies* de l'AIE (2017). Les prix du CO<sub>2</sub> du marché carbone européen (ETS) proviennent des résultats du modèle PRIMES (Agence suédoise de la protection de l'environnement, 2018, sur la base d'un scénario de référence du modèle européen PRIMES, communication personnelle d'Anna Krook-Riekkola). Afin de suivre les spécificités de chaque contexte national, les scénarios pour la France et la Suède reposent sur des hypothèses différentes pour les demandes de service énergétique. Les limites des options techniques disponibles sont adaptées à chaque pays. Les coûts et les autres caractéristiques techniques des technologies ne sont pas nécessairement les mêmes,

car ils peuvent provenir de données nationales. De plus, certaines options ne sont pas disponibles dans les deux modèles, par exemple l'option power-to-gas n'est disponible que dans TIMES-France. La possibilité d'isoler les bâtiments est endogène dans TIMES-France, alors que cela fait partie d'une hypothèse exogène dans TIMES-Sweden. Ce dernier est particulièrement précis pour la représentation de la biomasse (KROOK-RIEKKOLA et SANDBERG, 2018). Pour la France, la durée de vie des centrales nucléaires peut être prolongée de 20 ans pour un coût de 1 200 M€/kW, alors qu'en Suède, cette option n'est pas disponible, la durée de vie des centrales nucléaires ayant déjà été prolongée. Le taux d'actualisation est de 4,5 % en France, conformément aux recommandations de QUINET (2013), et de 3,5 % en Suède, conformément aux recommandations de l'Administration suédoise des transports concernant les grands investissements dans les infrastructures publiques (SIKA, 2014). L'horizon est 2050 dans les deux modèles.

Pour la France, le scénario FranceNeutrality respecte deux contraintes principales : l'une pour la neutralité carbone et l'autre pour la diminution de la part d'énergie nucléaire. L'objectif de réduction des émissions CO<sub>2</sub> est d'atteindre environ 11 MtCO<sub>2</sub> en 2050. Cette valeur est calculée en prenant en compte des réductions plausibles dans d'autres secteurs non représentés dans le système énergétique de référence (déchets, consommation non énergétique, agriculture et procédés industriels) et la disponibilité d'un puits lié à UTCATF. Le niveau de capture et de séquestration du carbone (CCS) disponible est de 20 Mt, dont 6,5 Mt pour le secteur industriel. La contrainte concernant la production d'énergie nucléaire précise qu'elle ne doit pas dépasser 50 % à partir de 2035 suivant la dernière déclaration du gouvernement (WAKIM, 2018). Les évolutions des demandes de service énergétique sont basées sur les hypothèses utilisées pour les scénarios nationaux de la DGEC telles que détaillées en section 4.2. Par ailleurs, une taxe carbone est introduite suivant les objectifs de la LTECV et concerne tous les secteurs à l'exception de l'industrie et de la production d'électricité et de chaleur. Elle commence à 14,5 €/tCO<sub>2</sub> en 2015, atteint 100 €/tCO<sub>2</sub> en 2030 et reste à ce niveau jusqu'en 2050 conformément à la LTECV.

Pour la Suède, le scénario est SwedenNeutrality. L'objectif de neutralité carbone (en concertation avec l'Agence suédoise de la protection de l'environnement) est traduit en un zéro net d'émission CO<sub>2</sub> avec une utilisation de BECCS permettant d'atteindre un maximum de 6,5 MtCO<sub>2</sub> d'émissions négatives (correspondant à 10 % des émissions de l'année 1990). Le scénario respecte une contrainte sur les émissions CO<sub>2</sub> linéaire entre 2030 et 2045 avec un niveau d'émissions de référence en 2030 et l'objectif de zéro émissions nettes en 2045. La contrainte est prolongée pour 2050 à zéro émissions nettes. Le scénario inclut les taxes suédoises existantes (taxes sur l'énergie et

le carbone). L'évolution de la demande de biens et services à forte consommation d'énergie est basée sur les indices obtenus en liant le modèle TIMES-Sweden à un modèle national d'équilibre général calculable de la Suède (EMEC) (KROOK-RIEKKOLA, BERG et al., 2017). La demande dans les transports est ajustée suivant les projections officielles (communication personnelle d'Anna Krook-Riekkola avec l'agence suédoise de protection de l'environnement).

#### 4.3.2.2 Résultats de l'exercice prospectif

**Consommation d'énergie finale** La consommation d'énergie finale française diminue de 24 % entre 2015 et 2050, alors qu'elle diminue de 7 % en Suède (voir la Figure 4.30). La consommation d'électricité en France augmente de 60 % contre seulement 33 % en Suède. Le défi représenté par l'augmentation de la production d'électricité est donc plus important en France qu'en Suède. En France, la consommation de gaz augmente jusqu'en 2035 mais diminue ensuite. Le gaz est toutefois remplacé par différentes sortes de gaz, biométhane et hydrogène dans le réseau. Ainsi, en 2050, plus de la moitié du gaz circulant dans le réseau est composée de biométhane (voir Figure 4.31). La diminution de la consommation de gaz constitue donc également un autre défi auquel la Suède ne sera pas confrontée. En effet, la consommation de gaz suédoise reste très faible tout au long de l'horizon. En Suède, la part de la chaleur et de la géothermie reste stable dans le mix énergétique. Entre 2015 et 2050, la principale différence est le niveau de consommation de pétrole dont la baisse est partiellement compensée par une augmentation de la consommation d'électricité.

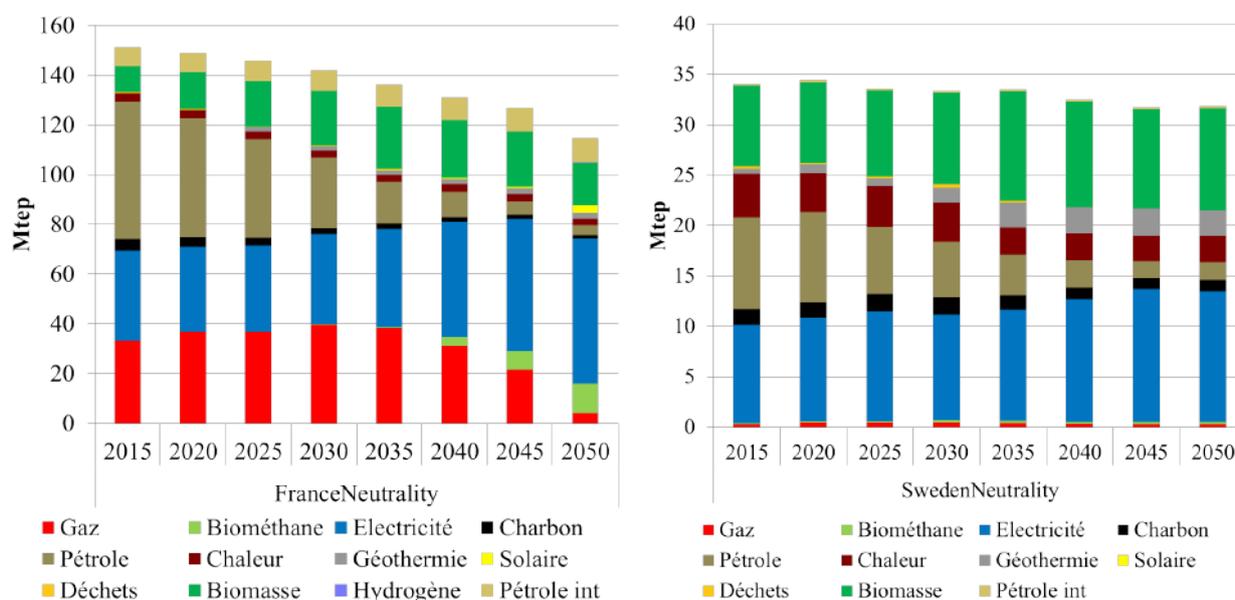


FIGURE 4.30 – Consommation d'énergie finale entre 2015 et 2050 en France et en Suède

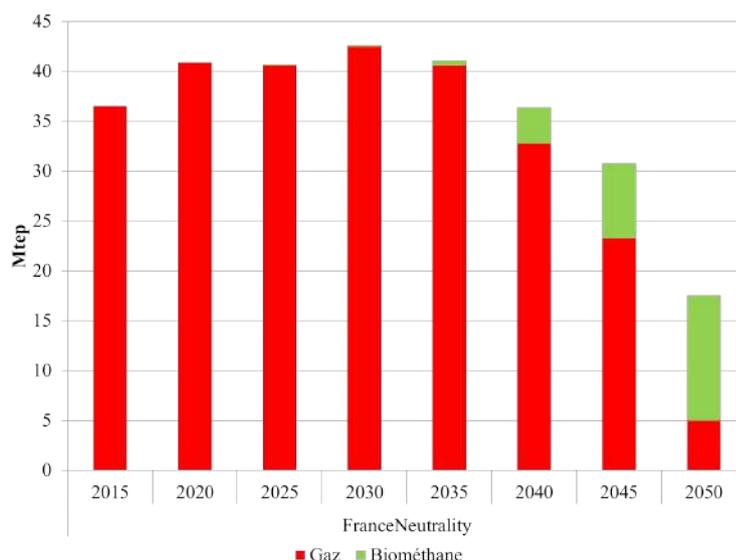


FIGURE 4.31 – Composition du gaz en France

**Production d'électricité** Les résultats du secteur de l'électricité en France montrent une augmentation significative de la production d'électricité de 31 % en 2050 (voir Figure 4.32). La durée de vie de certaines centrales nucléaires n'étant pas prolongée, il y a une légère diminution jusqu'en 2025. Afin de décarboner l'ensemble du système énergétique, l'électricité est davantage utilisée dans tous les secteurs. Contrairement à la France, la Suède a déjà augmenté sa production d'électricité et l'électrification de son système énergétique est déjà importante. Ainsi, l'augmentation de la production d'électricité est modérée : + 25 % en 2050 par rapport à 2015. En effet, en 2015, la France n'atteint pas le même niveau de consommation d'électricité dans son système énergétique (24 % en France contre 29 % en Suède en 2015).

L'électrification du système énergétique français implique une augmentation considérable de la capacité des installations. En comparaison avec la Suède, la France est donc confrontée à davantage de défis dans le secteur de l'électricité. Les deux pays installent de nombreuses capacités éoliennes et solaires (Figure 4.33), mais la Suède ne commence à construire des capacités solaires qu'à partir de 2040. Outre l'augmentation de la production d'électricité, la France doit également affronter sa dépendance vis-à-vis du nucléaire, puisque les durées de vie des centrales nucléaires actuelles sont prolongées. Malgré l'installation massive de capacités renouvelables et la contrainte sur la production nucléaire (fixée au maximum à 50 % de la production d'électricité totale à partir de 2035), de nouvelles centrales nucléaires sont construites à partir de 2040. La France fait donc face à des difficultés pour sortir du nucléaire. Dans un scénario avec l'impossibilité de construire de nouvelles centrales nucléaires, le système se trouve dans

un état « surcontraint » : pour respecter l'ensemble des contraintes imposées, des matériaux et de l'énergie sont importés par le système à un prix très élevé. En Suède, les capacités nucléaires sont réduites à zéro en 2050. Contrairement à la France, où l'installation de capacités BECCS est limitée, avec seulement 1,5 GW construit, la Suède installe 2,6 GW de BECCS en 2045.

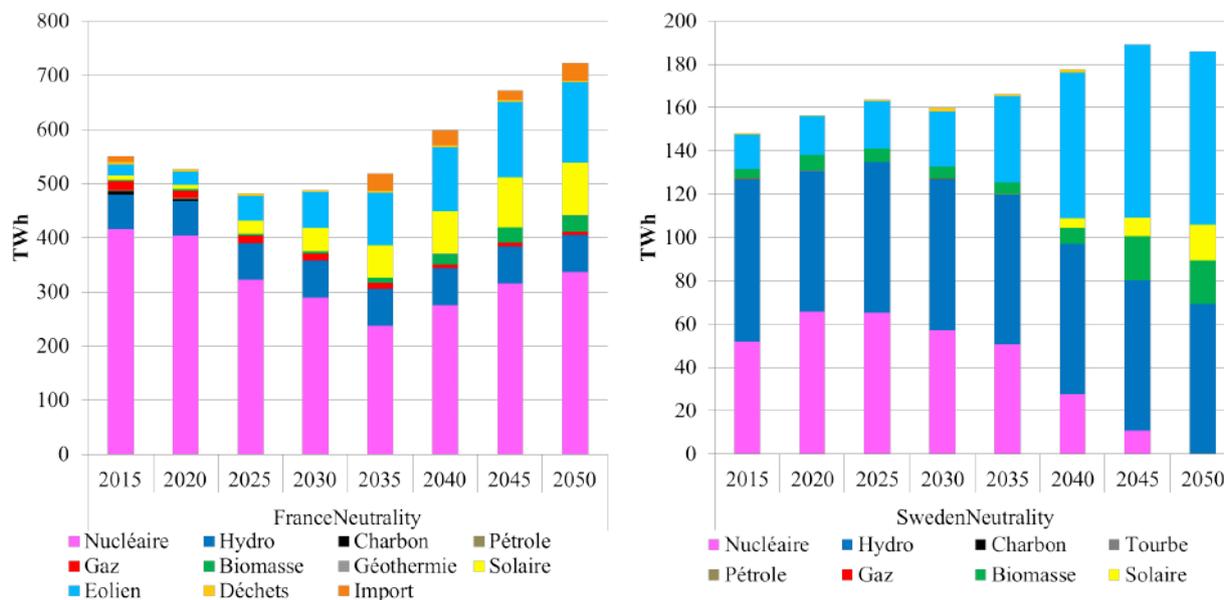
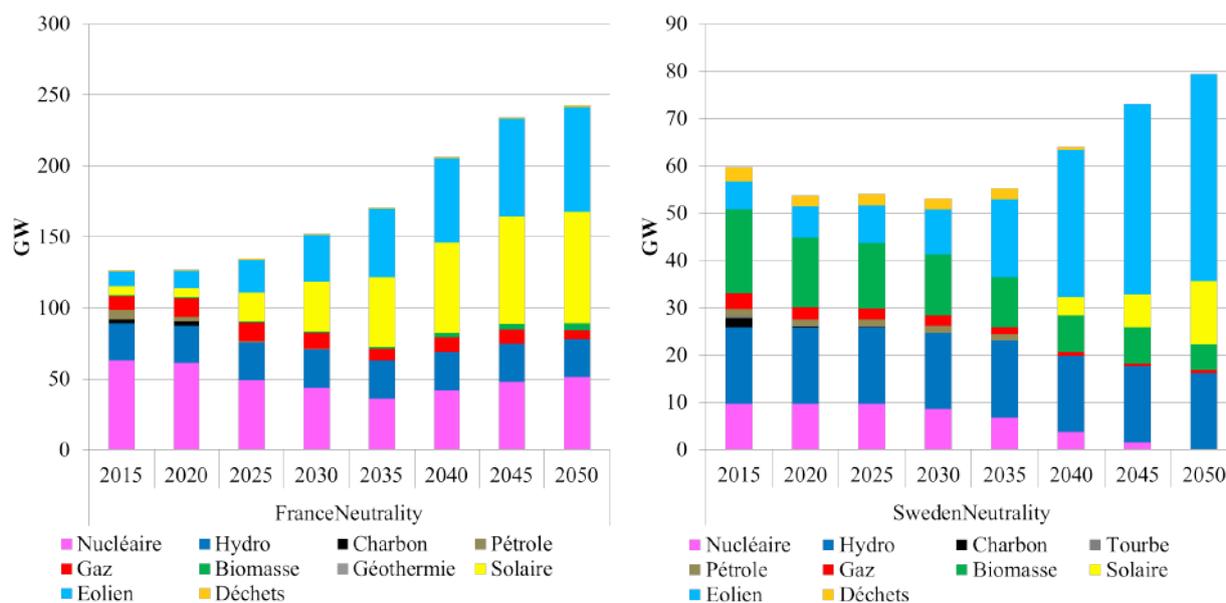


FIGURE 4.32 – Production d'électricité en France et en Suède



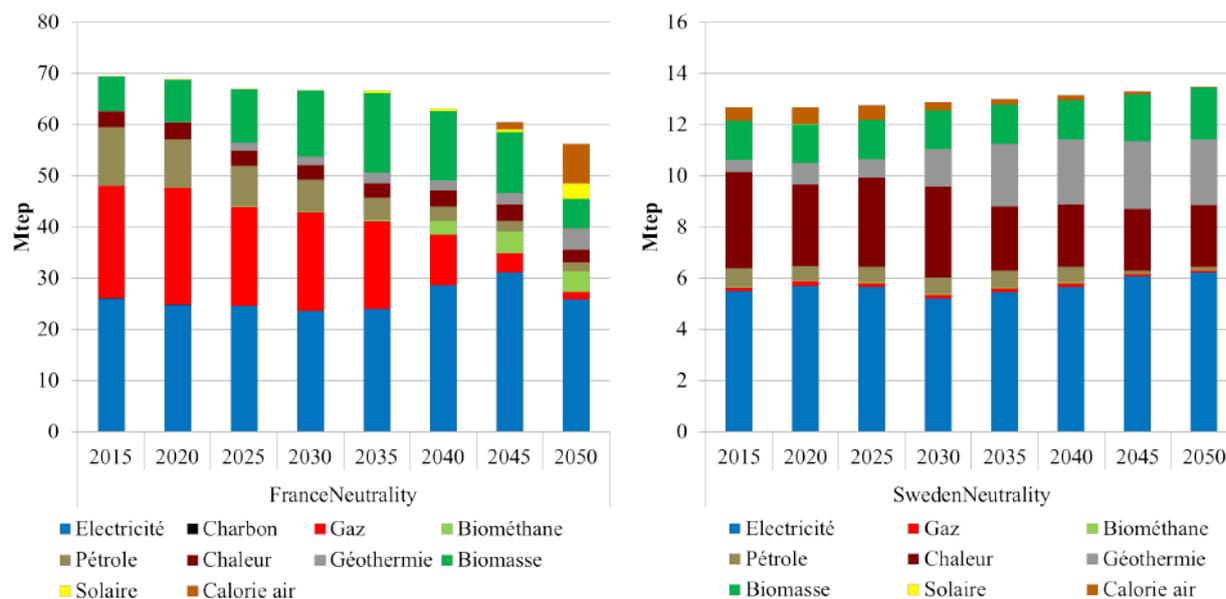


FIGURE 4.34 – Consommation d'énergie finale dans les bâtiments et l'agriculture en France et en Suède

**Industrie** La structure de l'industrie est très différente entre les deux pays. En Suède, l'industrie papetière consomme à elle seule plus de 50 % de l'énergie utilisée par le secteur, principalement de la biomasse et de l'électricité, le second consommateur d'énergie étant la sidérurgie (16 %). En France, la répartition est plus équilibrée entre la chimie (17 % en 2015), l'alimentation (19 %) et les minéraux non-métalliques (13 %) pour citer les principaux consommateurs. Les enjeux associés à la décarbonation du secteur de l'industrie sont donc très différents entre les deux pays.

La consommation d'énergie finale de l'industrie (voir Figure 4.35) augmente de 11 % en France, tandis qu'elle reste stable en Suède. Comme mentionné précédemment, l'électrification du système énergétique français augmente, en particulier dans le secteur industriel. La consommation de gaz augmente jusqu'en 2040 avant de diminuer très rapidement pour atteindre la neutralité carbone. La France doit donc diminuer sa consommation de gaz dans le secteur industriel. En Suède, celle-ci augmente fortement de près de 40 % mais les volumes concernés restent très faibles. La consommation de biomasse double en France alors qu'elle n'augmente que de 8 % en Suède. La part de la biomasse finale en 2050 reste cependant beaucoup plus importante en Suède qu'en France, 45 % contre 12 %. La stabilisation en Suède peut s'expliquer par l'utilisation de la biomasse dans d'autres secteurs, et en particulier dans les capacités BECCS. Son potentiel étant limité, le moyen le plus économique d'atteindre la neutralité nette est d'utiliser la biomasse pour des émissions négatives et de ne pas accroître son utilisation dans l'industrie. De plus, le mix énergétique suédois

est très peu modifié entre 2015 et 2050. Son secteur industriel a en effet déjà mis en place de nombreuses mesures pour décarboner sa consommation d'énergie. La part des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz) dans la consommation d'énergie finale, déjà basse en 2015 puisqu'elle s'élève à 26 %, diminue à 16 % en 2050. La tendance française est plus marquée puisque cette part passe de 62 % en 2015 à 17 % en 2050.

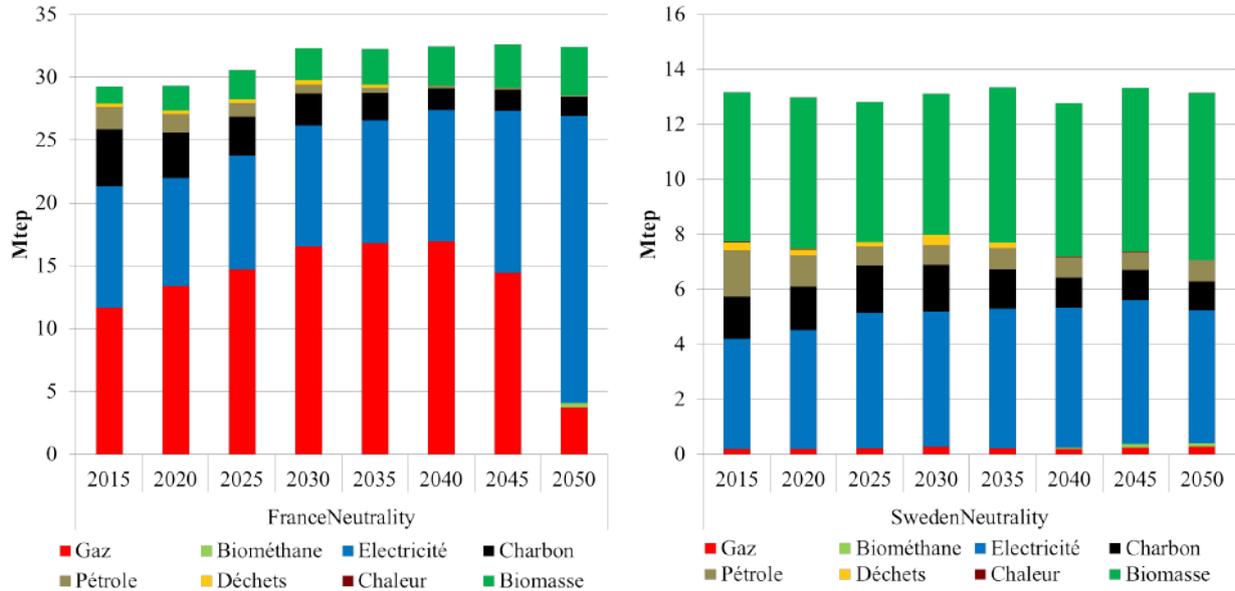


FIGURE 4.35 – Consommation d'énergie finale dans l'industrie en France et en Suède

**Transport** Bien que les deux pays n'aient pas mis en place de politique spécifique dans le secteur des transports, nous observons des différences significatives dans l'évolution du secteur (voir Figure 4.36). En France, la consommation de gaz augmente sensiblement entre 2015 et 2040, notamment dans les autobus et les véhicules de transport de marchandises. En 2050, ce gaz est totalement remplacé par le biométhane. En Suède, la consommation de biogaz reste très faible et les biocarburants sont plus largement utilisés. Dans les deux pays, l'électrification du secteur des transports augmente et commence à l'horizon 2030, mais ce changement se produit plus progressivement en France qu'en Suède.

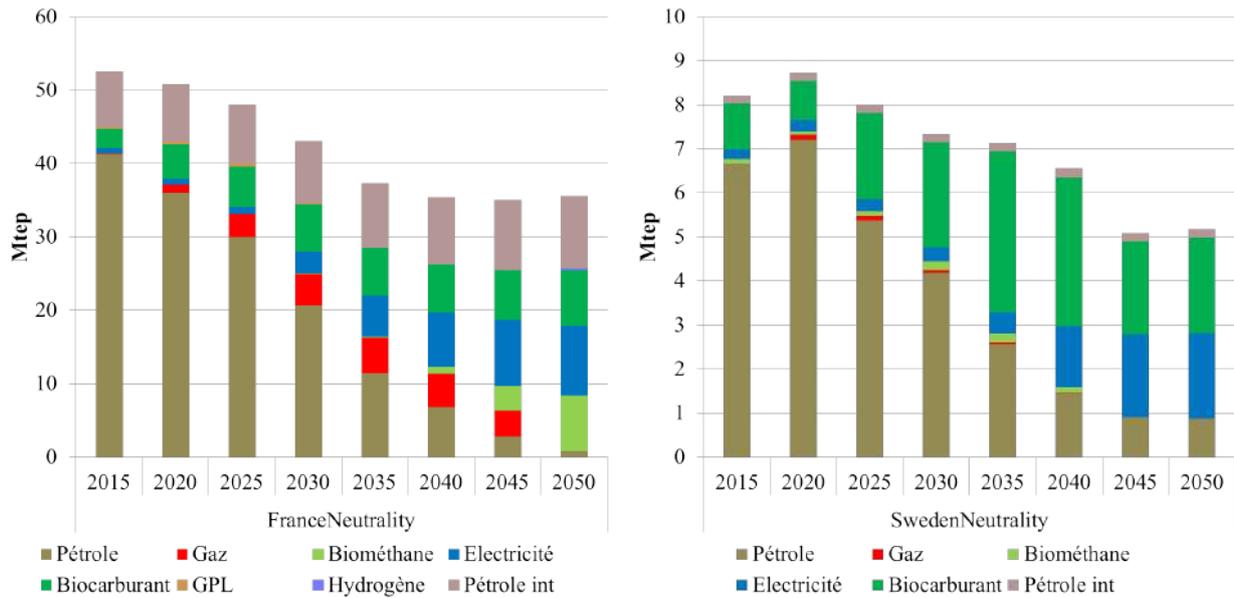


FIGURE 4.36 – Consommation d'énergie finale dans le transport en France et en Suède

**Émissions CO<sub>2</sub> et coût marginal** En Suède, entre 2015 et 2030, les émissions (voir Figure 4.37) diminuent d'abord dans les secteurs des transports et de l'énergie. Entre 2030 et 2040, les émissions du secteur industriel diminuent fortement. En 2045, les émissions résiduelles des secteurs de l'industrie, des transports et de l'agriculture sont compensées par les émissions négatives du secteur de l'énergie. En France, les émissions diminuent progressivement dans tous les secteurs sauf dans l'industrie où la réduction commence à partir de 2035. En 2050, les émissions restantes des secteurs des transports, du tertiaire et de l'industrie sont également compensées par des émissions négatives provenant du secteur de l'approvisionnement.

Dans les deux pays, le respect de la contrainte de neutralité carbone est possible, en plus des tendances déjà évoquées comme l'électrification, grâce au recours aux émissions négatives. En France, celles-ci proviennent des capacités BECCS dans le secteur de l'électricité et de l'épuration du biogaz en biométhane dans le secteur de l'approvisionnement. En effet, pour injecter du biogaz dans le réseau de gaz, le CO<sub>2</sub> contenu dans le biogaz doit être retiré. Le stockage de ce CO<sub>2</sub> dans le sol permet d'obtenir des émissions négatives (le biogaz étant une énergie renouvelable considérée comme neutre en émission CO<sub>2</sub>). En Suède, elles proviennent principalement des capacités BECCS dans le secteur de l'électricité. Le volume total de carbone stocké dans le sol s'élève à 6,5 MtCO<sub>2</sub> par an en Suède, tandis qu'en France, il s'élève à 20 MtCO<sub>2</sub> par an.

La valeur du coût marginal du CO<sub>2</sub> en 2050 est supérieure à 1 000 €/tCO<sub>2</sub> en France et à 380 €/tCO<sub>2</sub> en Suède (voir la Figure 4.38).

Cependant, en 2045, le coût marginal français s'élève à 422 €/tCO<sub>2</sub> pour une contrainte de réduction des émissions CO<sub>2</sub> de 84 % par rapport au niveau de 1990 au lieu de 97 % d'ici 2050. Les dernières tonnes de CO<sub>2</sub> sont en effet particulièrement coûteuses à compenser et concernent des secteurs où peu de substitutions sont possibles, comme la métallurgie, les industries des métaux non ferreux et le secteur agricole. Le niveau du coût marginal suédois semble ainsi indiquer que la trajectoire est plus facilement réalisable et pourrait traduire une fixation d'objectifs plus réaliste de la part des politiques.

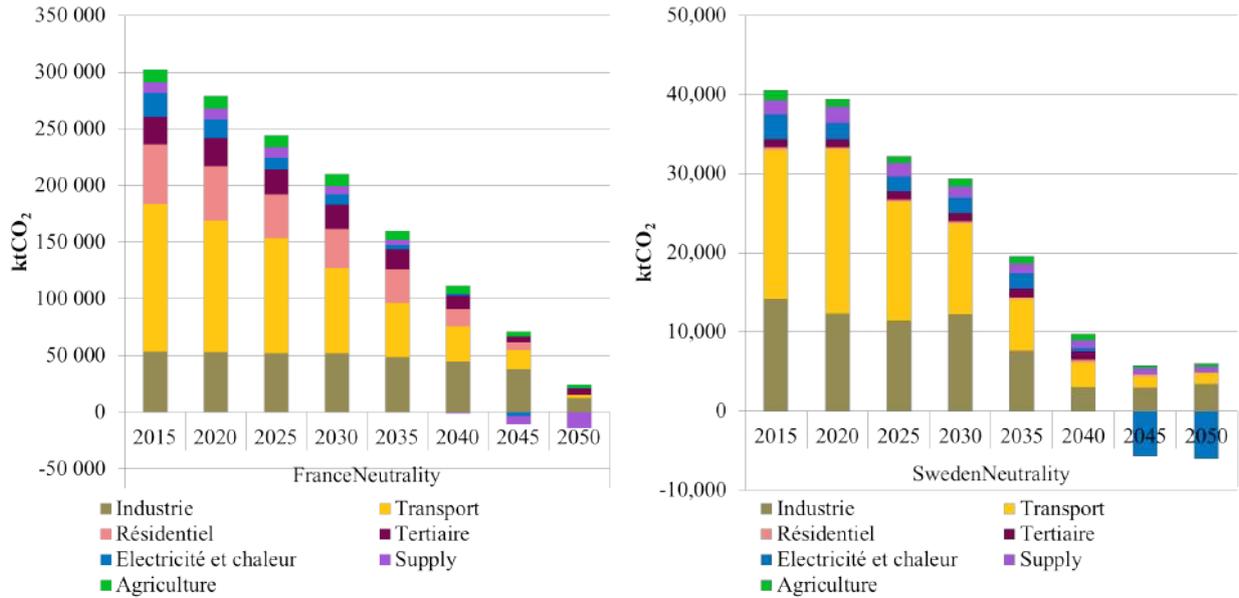


FIGURE 4.37 – Émissions CO<sub>2</sub> en France et en Suède

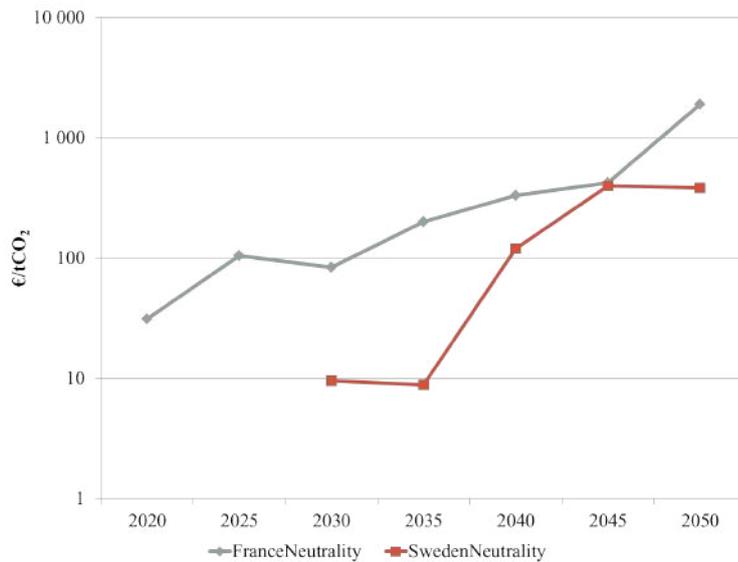


FIGURE 4.38 – Coût marginal du CO<sub>2</sub> en France et en Suède

#### 4.3.2.3 *Leçons d'une analyse prospective*

La Suède a déjà décarboné nombre de ses secteurs : les bâtiments sont presque neutres en carbone, le secteur de l'électricité et de la chaleur émet très peu de CO<sub>2</sub> et l'industrie est électrifiée et utilise beaucoup de biomasse. L'évolution du mix énergétique des secteurs du bâtiment et de l'industrie montre que les changements sont limités. Le principal défi pour ce pays concerne désormais les secteurs des transports et certaines branches de l'industrie dont notamment la sidérurgie qui est le principal consommateur de charbon. Au contraire, la France est confrontée à de nombreux autres défis : bien que son secteur électrique émette lui aussi peu de CO<sub>2</sub>, son secteur industriel, dépendant du gaz, n'est pas aussi électrifié que le secteur suédois et le secteur des bâtiments consomme encore beaucoup de combustibles fossiles (principalement du gaz naturel mais également du pétrole). En Suède comme en France, la décarbonation du secteur des transports constituera un défi majeur avec le développement des véhicules électriques et des infrastructures associées. De plus, la consommation de gaz en France est importante et devra être réduite pour atteindre la neutralité carbone même si le biométhane est développé pour remplacer le gaz naturel. La France doit également augmenter considérablement sa production d'électricité, ce qui implique un développement massif des capacités électriques, notamment éoliennes et solaires et même un maintien du nucléaire. En Suède, la production augmente aussi fortement malgré la sortie du nucléaire et ce, grâce au développement de l'éolien. La bioénergie doit, quant à elle, augmenter en France de manière significative dans tous les secteurs. Enfin, dans les deux pays, des émissions négatives sont nécessaires pour atteindre l'objectif de neutralité carbone et compenser les émissions restantes des secteurs difficiles à décarboner, comme certains secteurs à forte intensité énergétique (industries du fer, de l'acier et du ciment, par exemple).

#### 4.3.3 *Une disparité des orientations*

L'analyse des politiques publiques mises en place en France et en Suède permet d'expliquer la structure actuelle des mix énergétiques. Les systèmes énergétiques des deux pays partagent plusieurs similitudes au début des années 1970 : ils utilisent tous deux des fossiles, principalement du pétrole, ont développé l'hydroélectricité et envisagent de développer l'énergie nucléaire. Avec les chocs pétroliers, leur mix énergétique évolue différemment : la Suède met en place un ensemble de mesures dont le développement de l'énergie nucléaire, le déploiement des réseaux de chaleur et des incitations à l'utilisation de bioénergie, ce qui conduit à une diversification de son mix énergétique. Au contraire, en France, les efforts se portent principalement sur le nucléaire et donc le développement de l'électricité. Les mix énergé-

tiques actuels des deux pays diffèrent ainsi davantage aujourd'hui que dans les années 1970. Les politiques publiques ont joué un rôle important dans ces évolutions, malgré la disponibilité de ressources énergétiques décarbonées similaires (hydroélectricité et biomasse). Les deux pays ont connu une transition énergétique dans le secteur de l'électricité avec le développement du nucléaire mais la Suède a également mené une transition énergétique dans le secteur du chauffage avec le développement des réseaux de chaleur alimentés par de la biomasse.

Ces transitions énergétiques n'étaient pas motivées par des préoccupations environnementales. Dans les deux pays, les politiques publiques n'étaient pas conçues pour réduire les émissions CO<sub>2</sub> ou pour engager une transition énergétique. Leurs objectifs étaient de favoriser l'indépendance énergétique, de réduire la consommation de pétrole et de préserver la compétitivité des coûts. La caractéristique commune de ces mesures qui se sont révélées efficaces est le soutien politique fort et continu. Dans les deux pays, la décision de lancer un programme nucléaire a été prise avant le premier choc pétrolier, mais celui-ci a renforcé le soutien à la transition vers le nucléaire dont le développement a été motivé par l'amélioration de l'indépendance énergétique et des raisons économiques. En Suède, le passage à la bioénergie visait initialement à réduire la consommation de pétrole. Avec la montée des préoccupations concernant le changement climatique, les décisions passées se sont avérées efficaces pour réduire les émissions et favoriser un mix énergétique sobre en carbone. En particulier, l'introduction d'une taxe carbone a décarboné les secteurs du bâtiment et de l'électricité car des technologies de substitution étaient disponibles. Malgré son niveau élevé, elle n'a toutefois pas été suffisante pour déclencher une transition énergétique dans le secteur des transports (TVINNEREIM et MEHLING, 2018).

En Suède, le développement des réseaux de chaleur a également été favorisé par un programme de construction de logements, des subventions et différentes incitations destinées au niveau local et aux municipalités intéressées par les économies d'énergie. Le développement de la bioénergie faisait en outre partie d'un ensemble de mesures visant à réduire la consommation de pétrole. Au contraire, en France, la forte concentration sur le nucléaire a conduit à des surcapacités, ce qui a rendu le chauffage électrique plus rentable. De plus, il existait peu d'incitations à soutenir la consommation de bioénergie. Les ressources nationales de gaz ont conduit au développement d'un réseau, alors que la Suède était réticente à le développer pour des raisons géostratégiques. Ainsi, les politiques énergétiques des deux pays ont également été influencées par la présence des ressources naturelles.

Avec les outils de modélisation TIMES, nous avons analysé les implications des objectifs de neutralité carbone sur l'évolution du mix énergétique dans chaque pays et sur sa faisabilité. Les résultats ont

montré que, dans les deux pays, la consommation de pétrole diminue et l'utilisation accrue de l'électricité et du CCS ont pour effet de réduire les émissions CO<sub>2</sub>. Cependant, l'augmentation de la production d'électricité et de la consommation de biomasse est plus importante en France qu'en Suède. Les émissions négatives se déploient aussi différemment puisqu'elles débutent à partir de 2040 en Suède mais dès 2030 pour la France. En outre, le coût marginal du CO<sub>2</sub> est supérieur à 1 000 €/tCO<sub>2</sub> en France et s'élève à « seulement » 380 €/tCO<sub>2</sub> en Suède. Toutefois, en 2045, le coût marginal du CO<sub>2</sub> en France s'élève à 422 €/tCO<sub>2</sub>, un niveau similaire à celui de la Suède en 2050, ce qui souligne que ce sont bien les dernières tonnes d'émissions CO<sub>2</sub> qui sont les plus coûteuses à enlever. Ainsi, l'objectif de neutralité carbone semble plus difficile à atteindre en France qu'en Suède. L'objectif de décarbonation suédois implique en outre des changements moins importants dans chaque secteur du système énergétique qu'en France.

Grâce aux évolutions que la Suède a connues depuis les années 1970, le pays semble en effet mieux placé que la France pour atteindre la neutralité carbone. Le secteur du bâtiment et la production d'électricité sont presque neutres, alors que l'industrie est déjà électrifiée. En France, tous les secteurs, à l'exception de la production d'électricité, doivent réduire leurs émissions. Les deux pays ont toutefois besoin d'une vision à long terme afin de réorienter les systèmes énergétiques par rapport à leur évolution passée et éviter l'inertie. Dans cette perspective, les objectifs suédois semblent plus cohérents et réalistes. Les politiques publiques françaises étant initialement axées presque exclusivement sur le développement de l'électricité, il est désormais difficile d'aligner les objectifs de la loi sur un développement compétitif du système énergétique.

Les conditions initiales et les ressources nationales ont donc un impact sur l'évolution d'un système énergétique, comme le montre notre analyse des trajectoires des systèmes énergétiques suédois et français, passées et futures avec les modèles TIMES. Cependant, les politiques publiques jouent également un rôle important dans la transition énergétique. Ainsi, bien que les deux pays disposent d'un potentiel de biomasse similaire, les politiques publiques antérieures ont conduit à un développement différent de la bioénergie.

La gouvernance sera donc indispensable pour guider la transition énergétique bas-carbone. En Suède, le niveau local joue un rôle important dans la planification énergétique et a plus d'influence sur le système énergétique qu'en France qui a pendant très longtemps planifié ses investissements énergétiques de manière très centralisée. Dans les deux pays, les politiques publiques n'ont pas été motivées par les problèmes climatiques, jusque dans les années 1990 pour la Suède et jusqu'en 2000 pour la France. De plus, jusqu'à récemment, il n'existait aucun organisme référent dans les deux pays pour aider à gouverner la transition énergétique. La réduction des émissions

CO<sub>2</sub> a été réalisée en Suède grâce à un ensemble de politiques publiques cohérentes et en France par une focalisation sur le nucléaire. Cependant, de nouveaux outils de gouvernance ont vu le jour pour mener la transition énergétique bas-carbone ; en France avec la [LTECV](#), en Suède avec la dernière loi-cadre sur le climat. Ces deux lois ont institué des comités chargés de surveiller la transition et de conseiller le gouvernement. Pour le moment, l'efficacité de ces comités n'est pas démontrée. En France, l'approche des politiques publiques de la question énergie-climat n'a pour l'instant pas été modifiée. En Suède, le nouveau comité suédois, inspiré du système britannique, a été mis en place trop récemment pour être évalué et son efficacité reste, elle aussi, à prouver.

#### 4.4 CONCLUSION

Avec le modèle TIMES-France, nous avons exploré ce que seraient les leviers d'une transition énergétique bas-carbone française et les moyens de pilotage proposés pour la déclencher. Nous avons montré que la mise en place d'une taxe carbone conduirait à des niveaux trop élevés pour être acceptables socialement et politiquement. Cet outil doit ainsi être accompagné, par exemple, par des mesures réglementaires ou de redistribution. Pour piloter la transition énergétique, reposer uniquement sur une taxe carbone difficile à mettre en place ne semble donc pas être une stratégie adaptée.

Par ailleurs, il est important de comprendre les implications de la transition énergétique bas-carbone sur le système énergétique. Nous avons vu que dans le cas de la France, la neutralité est difficile à atteindre, et qu'elle est sujette à de nombreuses incertitudes entourant notamment la disponibilité de technologies clés comme le nucléaire ou le [CCS](#). Les modifications qui se produisent dans les différents secteurs sont également nombreuses et importantes : électrification, développement de l'usage de biocarburant et de gaz vert (biométhane) dans le transport, déploiement de [PAC](#) et isolation dans les bâtiments, augmentation des capacités de production d'électricité. La trajectoire pour un objectif de neutralité diffère par ailleurs significativement d'une trajectoire respectant les objectifs de la [LTECV](#), ce qui souligne la nécessité de déployer un pilotage adéquat du changement pour ne pas s'engager sur une trajectoire qui ne serait pas compatible avec les objectifs que l'on souhaite atteindre.

Enfin, dans la dernière partie, nous avons comparé les situations respectives de la France et de la Suède. Les ressources de chacun de ces pays ont influencé leurs trajectoires depuis 1970 mais les politiques publiques ont également joué un rôle important. Ainsi, grâce à la vision de long terme, systémique, développée par les pouvoirs publics, la Suède a réussi à augmenter sa consommation de bioénergies, ce qui a favorisé la baisse des émissions CO<sub>2</sub> dans beaucoup de secteurs.

Ces évolutions la placent aujourd’hui dans une position favorable pour atteindre un objectif de neutralité carbone malgré les défis que représentent encore certains secteurs comme celui du transport. Par ailleurs, l’expérience suédoise montre que la taxe carbone a été particulièrement efficace parce qu’elle s’inscrivait dans une stratégie de long terme et que des systèmes décarbonés étaient disponibles pour se substituer aux technologies carbonées.

Ces enseignements nous renforcent dans la conviction que le pilotage de la transition énergétique doit se faire de manière fine. Il s’agit d’« à la fois, 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). Alors que la taxe carbone constitue un élément de pilotage largement recommandé et prôné, son évaluation à travers les exercices de prospective proposés nous a permis de réaliser que certaines trajectoires peuvent avoir des coûts marginaux très similaires alors que les déclinaisons technologiques peuvent être différentes comme nous l’avons vu dans le cas des scénarios Neutralité. La Suède nous a également démontré que des conditions favorables, non seulement techniques (gisement de ressources, développement de technologies) mais également politiques, facilitent la transition. Toutes les transitions ne sont donc pas équivalentes. Il faut ainsi réfléchir à une nouvelle approche du pilotage de la transition énergétique, qui puisse nous guider tout le long d’une trajectoire du système énergétique et éclairer la question de la transition entre trajectoires.

Troisième partie

COMMENT PILOTER UNE TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE ?

## LA GOUVERNANCE ISSUE DES SUSTAINABILITY TRANSITIONS

---

Le pilotage de la transition énergétique est une question très étudiée, notamment par les sciences sociales et le courant des *Sustainability Transitions*. Le but de celui-ci est d'ailleurs d'analyser la gouvernance des transitions socio-techniques (SMITH, STIRLING et BERKHOUT, 2005) et de proposer des outils pour guider les transitions soutenables. Le courant a donc élaboré et proposé une nouvelle approche du pilotage de la transition énergétique avec le *Transition Management*. Mais nous verrons que cette théorie est sujette à de nombreuses critiques. Les cas d'applications sont d'ailleurs pour l'instant limités. Et il semble que ce courant soit plus utile pour analyser les grandes tendances passées que pour proposer réellement une nouvelle approche efficace de la gouvernance de la transition énergétique bas-carbone.

### 5.1 LE TRANSITION MANAGEMENT

S'inscrivant dans le courant des *Sustainability Transitions*, le *Transition Management* (TM) tire du cadre théorique présenté dans le chapitre 1, des préconisations pour la gouvernance de la transition. Rappelons que ce courant considère que la transition d'un régime socio-technique provient des interactions entre les différents niveaux du *Multi-Level Perspective* (MLP) et que celles-ci sont difficiles à maîtriser. Le *Transition Management* propose donc d'influencer la transition et non pas de la diriger ou de la contrôler. Un autre point clé, souligné par cette école, dans l'émergence d'une transition est l'apparition d'innovation systémique, véritable moteur de la transition autour duquel un régime socio-technique se reconfigure. Une bonne gestion de la transition va donc s'efforcer de favoriser leur émergence.

La gestion de la transition s'appuie sur plusieurs éléments (BOULANGER, 2008 ; LOORBACH, 2010 ; ROTMANS, KEMP et VAN ASSELT, 2001) :

- des arènes de transition : elles regroupent différents acteurs et parties prenantes du système socio-technique ainsi que des *outsiders* et des entrepreneurs. Les acteurs pleinement intégrés au régime en place doivent faire preuve d'ouverture d'esprit et d'autonomie tout en ayant de l'influence au sein de leurs structures afin de pouvoir diffuser les visions du futur développées au sein des arènes. Ce sont des *frontrunners*, ouverts à la discussion et à l'innovation.
- des visions du futur : ces images dessinent le futur vers lequel le système doit tendre. Elles doivent être soutenues par une

majorité d'acteurs. Elles permettent de formuler les objectifs de long terme ainsi que les chemins de transition menant vers ce futur. Les objectifs de long terme sont flexibles et doivent pouvoir être réévalués et réajustés tout au long du chemin de transition. Ils sont déclinés en objectifs intermédiaires qui doivent faire l'objet d'un processus d'évaluation constant et qui peuvent, eux aussi, être réajustés.

- des actions de court terme : les visions du futur se déclinent non seulement en objectifs mais aussi en expérimentations, telles que le soutien envers des projets d'innovations. Les innovations technologiques qui émergent au sein des niches doivent en effet être protégées et encouragées. Mais les expérimentations ne se limitent pas aux technologies, elles comprennent également les initiatives sociales. Ces différentes expériences doivent permettre d'accumuler de la connaissance (en combinant le *learning-by-doing* et le *doing-by-learning*) pour pouvoir être ensuite dupliquées à une échelle plus vaste et se diffuser au sein du régime.
- des processus d'évaluation : les évaluations concernent plusieurs aspects de la gestion de la transition dont les objectifs intermédiaires et de long terme, les expérimentations menées ou les politiques publiques mises en place mais aussi le processus de gouvernance de la transition lui-même. Elles permettent d'estimer la faisabilité des objectifs, pour éventuellement les réajuster, et d'établir un suivi de la transition.

La vision de long terme pour le futur du système est élaborée au sein des arènes de transition. Les acteurs venant d'horizons divers (entreprises, citoyens, état, associations), les visions partagées ne sont pas les mêmes au départ mais vont converger graduellement lors des échanges au sein de ces arènes. Le choix des membres des arènes de la transition est particulièrement important : une attention particulière doit être portée aux *frontrunners* capables d'apporter les innovations et les participants doivent pouvoir développer des visions de long terme sur le futur. Un agenda de la transition, associé aux visions, doit être également défini. Cette étape importante doit éviter les conflits avec les politiques publiques déjà mises en place.

La gestion de la gouvernance est un processus cyclique et itératif qui se déroule en plusieurs phases de la façon suivante (LOORBACH, 2007; LOORBACH, 2010) :

1. développer une vision de long terme et organiser l'arène de transition,
2. développer des visions du futur, et élaborer un agenda de la transition et des chemins de transition (à l'aide de méthodes de *forecasting* et de *backcasting*),
3. mener des expérimentations de transition et mobiliser les différents acteurs en réseau,

4. surveiller et évaluer le processus de transition ainsi que les expérimentations, ajuster les objectifs, les visions et l’agenda de la transition.

Ces différentes phases correspondent à différents types de gouvernance (voir la [Figure 5.1](#), LOORBACH, 2010) : stratégique dans la composition de l’arène et dans la définition des visions; tactique dans la mise au point des agendas de transition; opérationnelle dans la constitution des expérimentations; et enfin réflexive dans la surveillance et l’évaluation. Ce processus est mené sous la conduite de chercheurs qui connaissent le *Transition Management*. Le cycle du **TM** sert de base pour une mise en œuvre de la gestion de la transition et ne vise pas à imposer un ordre séquentiel immuable. Cette approche ambitionne d’influencer les activités « naturelles » d’auto-pilotage et de gouvernance présentes dans la société (LOORBACH, 2010). Selon BOULANGER (2008), « la gestion de la transition se présente comme un processus cyclique et itératif d’apprentissage collectif, géré par une équipe de représentants du gouvernement et d’experts ».

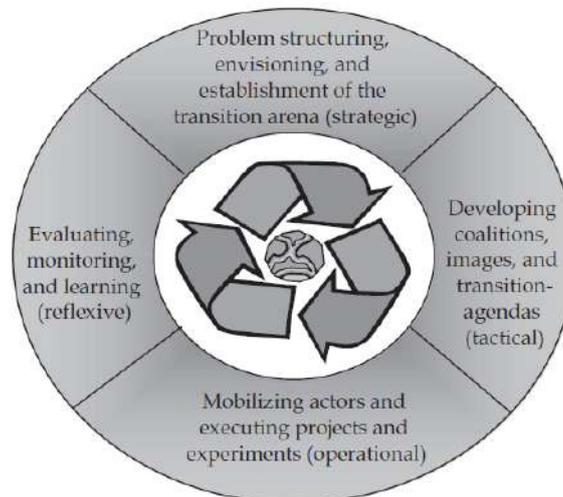


FIGURE 5.1 – Le cycle du *Transition Management*

Source : LOORBACH (2010)

Pour accompagner une transition du système socio-technique vers un objectif de durabilité, les pouvoirs publics ont donc pour rôle d’organiser ces arènes de transitions et de protéger les niches où les innovations systémiques peuvent émerger. L’État ne doit pas être trop présent dans les arènes car les réseaux d’acteurs doivent émerger et il faut laisser la place à de l’auto-organisation. Un autre dispositif central du **TM** est la création de niches ou d’espace pour les innovations : les expérimentations menées s’inscrivent dans l’approche du *learning by doing*. En encourageant ces essais, la connaissance va s’accumuler et pourra se diffuser au sein de la société. L’espace nécessaire pour les innovations se combine avec la reconnaissance d’incertitudes envers les

innovations qui permettront de transiter. Il s'agit de ne pas sélectionner trop tôt une technologie particulière ou une initiative sociale pour ne pas s'enfermer dans une trajectoire et d'avoir de la flexibilité pour le long terme. Mais une protection est également nécessaire car le marché peut empêcher leur émergence. Ce courant élabore donc des préconisations pour une nouvelle gouvernance de la transition, en se situant à l'interface de la gouvernance d'état et de marché, en combinant des instruments issus de la planification centralisée et du marché (incitations, régulation par les prix).

La gouvernance de la transition se veut réflexive : « the management model is far from deterministic, but rather reflexive » (LOORBACH, 2010). Les processus d'évaluation sont primordiaux, non seulement envers les expérimentations mais également concernant la gestion de la gouvernance elle-même afin de l'adapter et l'orienter suivant l'évolution du système socio-technique considéré. Le pilotage de la transition cherche à améliorer cette réflexivité qui peut à travers des méthodes de prospective proposer des visions du futur. La gestion du changement est donc un processus réflexif de recherche, d'apprentissage et d'expérimentation (LOORBACH, 2010).

La gouvernance du *Transition Management* s'inspire également de la théorie de la complexité (LOORBACH, 2007). La société fait face à plusieurs niveaux de complexité : interne, externe, et celle du niveau de la gouvernance. L'organisation interne de la société est en effet de plus en plus intriquée avec notamment l'émergence des sociétés de réseau et les problèmes créés deviennent très complexes : « they are rooted in different societal domains, occur on varying levels, and involve various actors with dissimilar perspectives, norms, and values » (LOORBACH, 2010). Quant à la gouvernance, elle est dépendante de son environnement politique et social et doit donc prendre en compte, elle aussi, cette complexité : « "governance" is characterized by diversity, uncertainty, heterogeneity of society, and the decreased possibilities for inducing long-term change by government » (LOORBACH, 2010). En adoptant une « gouvernance complexe », c'est-à-dire en laissant de la place aux incertitudes et aux variations, la théorie de la complexité conduit à créer des espaces institutionnels et financiers pour les innovations et les processus d'auto-organisation (LOORBACH, 2007).

Cette complexité de la gouvernance implique quelques principes que l'on retrouve dans le TM : le moment de l'intervention, la gestion de la transition via des équilibres et des déséquilibres et la gestion de l'intérieur et de l'extérieur du système social (LOORBACH, 2010).

Pour enclencher une transition, le processus d'innovation est fondamental. Ce sont les innovations qui permettent de transformer le régime. Des fenêtres d'opportunité doivent être créées lors desquelles les innovations vont pouvoir se développer. Cette création passe par la construction d'un soutien de la société et des entreprises, favorisé par un engagement fort des différentes parties prenantes, une gouver-

nance polycentrique et des réseaux de coordination entre les différents acteurs (GEELS, SOVACOOOL et al., 2017).

### *Cas d'applications du Transition Management*

Plusieurs cas d'applications des principes du *Transition Management* ont été menés, généralement à l'échelle régionale mais aussi locale (au niveau d'une ville par exemple) ou nationale. Les premières expérimentations ont notamment eu lieu dans les pays des chercheurs ayant développé le TM comme les Pays-Bas. Ainsi, la première expérience s'est déroulée dans une région minière des Pays-Bas (LOORBACH et ROTMANS, 2010). Le but était de proposer une vision stratégique pour la région en favorisant la coopération entre les différentes municipalités. Une autre expérimentation aux Pays-Bas a été conduite dans le domaine de l'énergie avec un programme de transition du système énergétique (KEMP, ROTMANS et LOORBACH, 2007; KEMP, 2010). Débuté au début des années 2000, ce programme a été abandonné après une dizaine d'années à cause de la résistance des acteurs en place (KERN et SMITH, 2008; BOSMAN et ROTMANS, 2016). Le projet a permis de créer des réseaux d'expérimentations, d'apprentissage et de lien social mais a échoué au niveau de la mise en place des politiques et n'a pas permis de mettre en place un approvisionnement énergétique soutenable.

En Belgique, deux expérimentations ont eu lieu, l'une concernant la gestion des déchets, et l'autre pour l'aménagement du territoire. La première, dénommée Plan C, a été mise en place pour réfléchir à une meilleure gestion des déchets et à une optimisation de leur organisation. Les visions développées dans les arènes de transition ont conduit à la représentation d'une région développant l'économie circulaire, avec une augmentation du recyclage et une réduction des matières premières utilisées, grâce à une gestion organisée des ressources (BOULANGER, 2008; LOORBACH et ROTMANS, 2010; PAREDIS, 2011). La seconde, dénommée DuWoBo (renommée depuis en Arena +), concernait un projet d'aménagement du territoire afin de proposer un système de logement plus soutenable. La vision développée propose un système orienté vers les services avec des habitants pouvant facilement s'adapter et choisir un nouveau logement. Les constructions sont soutenables, adaptées à leur environnement et permettent une plus grande flexibilité dans l'organisation de l'espace urbain (BOULANGER, 2008; PAREDIS, 2015).

D'autres projets ont été menés parmi lesquels nous pouvons citer un programme dans le domaine de la santé aux Pays-Bas pour repenser son organisation dans le long terme (LOORBACH et ROTMANS, 2010) ou des projets dans plusieurs villes européennes (ROORDA et WITTMAYER, 2014). BOULANGER (2008) mentionne également un projet de TM dans le secteur de l'agriculture qui aurait échoué « en partie par suite de divergences trop profondes entre les croyances et les visions du

monde des participants » (voir également GRIN et al., 2004). Ces programmes de transitions, menés dans des secteurs variés, ont eu des résultats mitigés même s'il est toujours plus difficile d'avoir accès à des informations concernant les projets qui ont connu des échecs. De nombreuses critiques ont été formulées concernant l'approche du TM et les fondements théoriques associés comme nous allons le voir dans la partie suivante.

## 5.2 LES CRITIQUES DU MOUVEMENT

Le mouvement des *Sustainability Transitions* a suscité plusieurs critiques, certaines émises par des chercheurs au sein même du courant (GEELS, 2011). Elles portent non seulement sur les fondements théoriques mais également sur leur mise en application à travers le *Transition Management*.

Un premier groupe de critiques porte sur le concept d'innovation systémique. En effet, ce sont ces innovations qui permettent de faire la transition, c'est-à-dire d'entraîner une reconfiguration du régime socio-technique. Les chercheurs du courant insistent sur la différence entre innovation incrémentale et innovation systémique, la première faisant partie de l'état dynamique naturel d'un régime socio-technique, la seconde permettant de modifier ce régime. Cependant, cette différence peut paraître arbitraire et MEADOWCROFT (2009) souligne combien il est difficile de faire la distinction entre les deux. Par exemple, une technologie de capture et séquestration du carbone (CCS) peut relever de l'une ou de l'autre selon le point de vue adopté : dans un premier cas, le CCS permet de continuer à utiliser des énergies fossiles et correspond alors à une innovation incrémentale ; dans le deuxième cas, le CCS permet une meilleure intégration des énergies renouvelables intermittentes et constitue une innovation systémique. En effet, dans un réseau électrique alimenté principalement par de l'éolien ou du solaire, il faut pouvoir disposer en système de secours de moyens pilotables qui peuvent être constitués de centrales fossiles ou biomasse couplées à des systèmes CCS. La technologie CCS peut également permettre de construire une économie basée sur l'hydrogène grâce notamment à la méthanation ou au power-to-gas. Dans ce cas, cette technologie entraîne alors une reconfiguration du système.

En outre, cette insistance sur les innovations favorise une vision technocentriste (AUDET, 2015). L'innovation est vue comme le moteur de la transition au détriment de l'innovation sociale. GEELS (2014) reconnaît lui-même l'absence de prise en compte des dimensions sociales et politiques dans le cadre d'analyse du *Multi-Level Perspective* qui repose principalement sur la dimension technique. L'aspect social de la transition est pourtant bien présent dans la description et l'analyse proposées par les chercheurs du courant des *Sustainability Transitions*. Cependant, dans la pratique du TM ce sont bien les innovations tech-

niques qui sont privilégiées. Ce focus sur la technologie remet en question le positionnement de ce courant qui se voulait en rupture vis-à-vis de la modernisation écologique. Les apports théoriques qui ont alimenté les *Sustainability Transitions* sont d'ailleurs issus de ce courant comme les travaux des sociologues Anthony Giddens et Ulrich Beck qui ont développé les concepts de modernité réflexive et de société du risque. Le *Transition Management* semble donc proposer une gestion de la transition compatible avec le développement économique et technologique en s'inscrivant dans la continuité des préoccupations de la modernisation écologique.

Un autre groupe de critiques porte sur la définition de la transition qui peut apparaître floue. GEELS et SCHOT (2007) reconnaissent eux-même que « what looks like a regime shift at one level may be viewed merely as an incremental change in inputs for a wider regime at another level ». En fait, la transition d'un régime socio-technique a des impacts sur tous les composants du régime : les préférences des consommateurs et le système de valeur sont affectés et pas uniquement le fonctionnement technologique du régime. Pourtant, plusieurs études relevant des *Sustainability Transitions* n'explicitent pas toujours clairement en quoi le changement analysé implique un tel bouleversement du régime, au-delà du régime associé au secteur étudié (par exemple, VERBONG et GEELS, 2007).

De plus, MEADOWCROFT (2009) souligne la difficulté de déterminer la fin d'une transition car celle-ci est un « messy and open ended process ». Les objectifs d'une transition ne sont pas fixes dans le temps et peuvent évoluer suivant les préférences exprimées par la société. Il est donc difficile de dire si la transition a été réalisée ou non, et ce n'est que rétrospectivement qu'on peut juger si une transition a eu lieu.

Concernant la filiation théorique, AUDET (2015) considère que les concepts de réflexivité et de complexité qui irriguent les *Sustainability Transitions* ne sont pas compris de la même façon par les différents chercheurs, suivant qu'ils se réclament plutôt d'un courant ou d'un autre. Ces concepts « sont à la fois différents et analogues, ce qui engendre des glissements sémantiques ». En effet, la réflexivité renvoie à l'analyse que les acteurs ont sur leur propre pratique. Pour les tenants de la complexité, la réflexivité se rapporte aux principes théoriques issus de la science des systèmes complexes dont notamment l'émergence d'une organisation spontanée d'un système. Ces deux concepts doivent faire appel l'un à l'autre pour mieux s'appréhender mais aboutissent à « une logique de justification qui est circulaire et tautologique » (AUDET, 2015). Ce débat épistémologique n'est pour l'instant pas clarifié.

La mise en application des concepts développés dans le *Transition Management* (TM) a également soulevé de nombreuses critiques. Tout d'abord, dans les cas d'applications du TM, les effets concrets de la

mise en place des structures de gouvernance sont parfois difficiles à évaluer. KERN et SMITH (2008) concluent l'analyse de l'expérimentation aux Pays-Bas par le constat que le TM a pour l'instant eu un impact marginal sur la politique énergétique et sur le régime socio-technique dominant. KERN (2013) constate par la suite que l'expérience de gestion de la transition aux Pays-Bas a du être arrêtée en 2011 et que ses objectifs initiaux ne semblent pas avoir été atteints. Le problème de la représentativité des acteurs a entraîné une discussion centrée sur les représentants du régime historique et sur l'aspect technologique au détriment d'une analyse plus large des changements socio-techniques à engager.

D'autres expériences semblent souffrir des mêmes maux : en Belgique, les expérimentations sur les déchets et l'habitat ont posé des difficultés similaires (PAREDIS, 2013). Le TM est utile pour initier un réseau d'acteurs et des expérimentations mais pour passer à l'échelle supérieure, les arènes doivent contrer l'inertie institutionnelle et sortir des cycles itératifs du TM. Celui-ci offre en pratique peu d'outils pour arriver à changer ces structures car la théorie issue du TM ne s'applique plus. En pratique, l'impact du TM sur les structures existantes semble donc limité. Kemp reconnaît lui-même que le « transition management is not the open, reflexive process it was supposed to be » (KEMP, ROTMANS et LOORBACH, 2007).

Les cas d'applications du *Transition Management* se focalisent pour l'instant sur certains secteurs : l'habitat en Belgique, l'énergie électrique aux Pays-Bas, etc. Pour mettre en place une transition du système énergétique dans son ensemble, il faudrait mettre en place de tels systèmes de gouvernance pour chaque secteur. Par ailleurs, les expériences ont souvent été menées à des échelles locales ou régionales, très rarement nationales. L'expérience aux Pays-Bas n'est en outre pas facilement généralisable à de plus grands pays européens puisque la représentativité des acteurs est plus simple à assurer pour des échelles plus petites. La mise en place du TM semble donc particulièrement complexe pour faire une transition énergétique bas-carbone à une échelle nationale.

D'autre part, le choix des participants dans les arènes de transition est particulièrement difficile à effectuer (BOULANGER, 2008). Les personnes au profil adéquat apparaissent comme des perles rares : tout en représentant leur partie prenante originelle, elles doivent en être indépendantes et prêtes à ne pas défendre l'intérêt établi de la position de leur organisation. Ces *frontrunners* doivent avoir également une capacité d'ouverture non seulement vis-à-vis des autres participants mais aussi envers les innovations susceptibles de modifier le régime. En outre, elles doivent connaître le processus de TM, comprendre ses objectifs et son vocabulaire. En pratique, ces différentes qualités semblent difficiles à concilier.

Une fois réunis les participants d'une arène, il est aussi particulièrement difficile de construire une vision commune dans laquelle les acteurs se retrouvent. La notion de transition est ambiguë et chacun la conçoit d'une manière différente (HENDRIKS, 2009). La capacité à forger un consensus et à mobiliser autour des enjeux environnementaux est une étape importante du TM mais les participants n'appréhendent pas de la même façon le futur et ne partagent pas la même conception du développement durable (BOULANGER, 2008). Par ailleurs, il est également difficile de maintenir l'implication des différents acteurs d'une arène tout au long du processus de TM.

Enfin, le positionnement des arènes par rapport au gouvernement est délicat car leur capacité d'action est limitée. Leur poids véritable dans la prise de décision n'est pas clairement établi. L'institutionnalisation du processus est donc une étape difficile : il faut réussir à promouvoir l'esprit d'indépendance des participants, les *frontrunners*, tout en inscrivant leur message dans les institutions qui donnent du poids au changement insufflé. La question de leur représentativité est également posée. En pratique, la plupart des personnes participant aux arènes de transitions proviennent d'un nombre de groupes limité. L'expérience menée aux Pays-Bas a montré que les acteurs des entreprises d'énergie historiques étaient majoritaires dans le processus de TM (KERN et SMITH, 2008). Une arène de transition doit cependant inclure non seulement les acteurs historiques mais également de nouvelles personnes, des innovateurs ou des *outsiders*. Ce problème de représentativité est aussi lié aux questions de démocratie (HENDRIKS, 2009). La vision d'un système soutenable, les objectifs à atteindre ont des implications sur le système social et la démocratie puisque le chemin vers ce futur n'est pas forcément équitable ni juste. Cette critique soulève alors un autre point : pour que le processus de TM soit efficace et représentatif, il faut une culture du consensus forte et développée. On voit alors mal comment transposer ce processus de gestion dans les pays où la culture du dialogue est limitée et encore moins comment généraliser ce processus dans les pays non démocratiques (BOULANGER, 2008).

Un autre groupe de critiques porte sur la dimension apolitique du champ des *Sustainability Transitions* (MEADOWCROFT, 2011), « c'est-à-dire la tendance à occulter les relations de pouvoir qui existent dans tout processus de changement social » (AUDET, 2015) et donc les discussions autour des conflits et du pouvoir. HENDRIKS (2009) souligne l'importance de la démocratie dans la prise de décision : les arènes doivent avoir une légitimité dans la représentation démocratique pour pouvoir prendre justement des décisions politiques. Mais le problème de représentativité des arènes obère cette légitimité. Cette problématique n'est que peu prise en compte parmi les représentants du TM. HENDRIKS (2009) appelle donc à une réflexion sur la façon dont notre démocratie fonctionne. SHOVE et WALKER (2007) remettent en cause

la capacité à accompagner le changement et la transformation d'une société même de façon réflexive. En effet, ils insistent particulièrement sur la dimension politique nécessaire dans un processus de TM et interrogent les relations entre les acteurs qui sous-estiment les rapports de pouvoir.

Pour MEADOWCROFT (2009), les mécanismes du *Transition Management* ne sont pas adaptés pour négocier la dimension politique. En effet, les décisions seront en définitive politiques. Or, les arènes de transitions ne sont pas des processus politiques et ne sont pas habilitées à prendre des décisions de cette nature. Choisir l'équilibre entre différents objectifs, trouver un compromis entre les gagnants et les perdants d'une transition ou entre avantages et désavantages d'un chemin de transition plutôt qu'un autre sont fondamentalement des décisions ou des compromis politiques. Dans les premières étapes du processus de TM, surtout dans l'étape de soutien de différentes technologies, il n'y a pas besoin de processus politique. Mais lors du choix entre différents chemins, lorsque des ressources doivent être engagées pour un soutien plus fort, le débat redevient politique. Ainsi, la transformation des systèmes énergétiques « will prove to be a messy, conflictual, and highly disjointed process » (MEADOWCROFT, 2009).

AUDET (2015) émet une dernière critique contre le courant des *Sustainability Transitions*. Avec l'appropriation des concepts du courant par le champ politique, notamment aux Pays-Bas, l'interprétation qui en est faite s'éloigne de l'originale conduisant à une double herméneutique (AUDET, 2014). La vision technocentriste et apolitique du courant se retrouve ainsi réutilisée dans une démarche politique par différents acteurs de gouvernements ou d'institutions étatiques.

### 5.3 CONCLUSION

En résumé, les critiques du courant des *Sustainability Transitions* portent principalement sur la vision technocentriste de la transition qui s'inscrit ainsi dans la tradition de la modernisation écologique (AUDET, 2015). Le cadre d'analyse du *Multi-Level Perspective* et la définition de la transition suscitent eux aussi des critiques à cause notamment du caractère apolitique des relations entre les différentes parties prenantes et, en particulier, dans leur déclinaison au sein du *Transition Management*. Les arènes du TM sont ainsi accusées de manque de représentativité et de ne pas être démocratiques. L'influence du champ des *Sustainability Transitions* est bien réelle et dépolitise la question de la transition. Enfin, comme le fait remarquer BOULANGER (2008), le TM ne vise pas à agir directement par la voie réglementaire. Or, cette option n'est pas à écarter si elle peut permettre de favoriser une transition. Le rôle du gouvernement est par ailleurs complexe au sein du processus de TM car il doit être à l'écart tout en assurant l'institutionnalisation du processus. Pour reprendre les termes de BOULANGER (2008), on

peut légitimement se demander si cette approche est vraiment réaliste. Comment combiner cet esprit de consensus, d'ouverture, des *frontrunners* et assurer à la fois continuité et stabilité? Le pilotage de la transition énergétique bas-carbone proposé par le *Transition Management* paraît donc très incertain.

Une autre critique que l'on pourrait apporter concerne à nouveau les innovations : supposons qu'il n'y ait pas d'innovations techniques capables d'entraîner un mouvement de reconfiguration du régime. Doit-on pour autant renoncer à mener une transition? Étant donné les dégâts occasionnés par une augmentation des émissions de GES, l'action reste nécessaire pour modifier le régime. Même si les innovations techniques systémiques n'émergent pas, il faudra engager une transition. Cette possibilité n'est pas à écarter puisque les innovations de ce type sont, par nature, incertaines. Dans cette perspective, on pourrait adopter une démarche plus prudente en considérant qu'il faut mener une transition avec les moyens actuels. Cette vision se rapproche de celle développée dans le [chapitre 4](#) consacré à la prospective où l'on envisage des évolutions du système énergétique à partir d'une évolution raisonnable des technologies actuelles et futures.

## QUELS APPORTS DU PHÉNOMÈNE DE TRANSITION DE PHASE EN PHYSIQUE ?

---

*Deux dangers ne cessent de menacer le monde : l'ordre et le désordre.*

— Paul Valéry

L'utilisation excessive de l'expression de transition énergétique, galvaudant son sens, a brouillé toute velléité d'élaboration du pilotage adéquat qui devrait lui être associé. L'association de la notion de transition avec le contexte énergétique s'est répandue seulement depuis une petite dizaine d'années dans le débat public. Pourtant, la transition en tant que telle est un phénomène bien connu des physiciens. Elle relève de la théorie des transitions de phase, largement développée et analysée en physique depuis plus d'un siècle (DOMB, GREEN et LEBOWITZ, 1972 –2001) et renforcée par les apports successifs de la thermodynamique et de la physique statistique. Cette théorie a notamment été utilisée pour expliquer le changement brusque d'ordre magnétique dans les aimants (CURIE, 1895 ; LANGEVIN, 1905). Aussi, il nous a paru prometteur d'envisager comment une analogie avec la théorie des transitions de phase en physique pourrait permettre l'élaboration d'un cadre de réflexion pertinent du phénomène de transition énergétique. Cela nous conduira à proposer une nouvelle méthode de pilotage de cette transition.

La physique des transitions de phase fournit un cadre théorique intéressant dans le contexte du changement climatique. Du point de vue des effets, parler de la transition du système énergétique, qui est un système particulièrement complexe, renvoie à un changement qui n'aura pas tendance à engendrer un processus régulier de transformation comme observé dans l'évolution d'un scénario *Business as usual* (BAU). Pour parvenir à réduire les émissions de GES d'un facteur 4 ou même atteindre la neutralité carbone, il faudra modifier de manière significative le système énergétique comme nous avons pu l'illustrer avec le modèle TIMES-France (chapitre 4) : une réduction aussi importante des émissions implique des bouleversements et des ruptures profonds dans tous les secteurs technologiques, mais aussi d'un point de vue comportemental, financier, géopolitique, etc., c'est-à-dire dans toutes les dimensions qui fondent les sociétés actuelles. On parle alors de problème systémique (MIKHAILOV et CALENBUHR, 2002).

---

. Le chapitre 6 a bénéficié des conseils et remarques avisés de Vincent Mazaucric de Schneider Electric.

Du point de vue analytique, la physique statistique procure un cadre propice pour étudier l'apparition éventuelle de phénomènes caractéristiques des transitions de phase, tels que des changements brusques (discontinuités) ou l'existence de phénomènes critiques (divergence) sous une variation continue d'une variable d'état. Dans tous les cas, il s'agit d'exhiber un changement de cohérence spatiale du système dans lequel un ordre local engendré par une interaction à courte portée se propage ou non à grande distance.

Du point de vue méthodologique, l'étude des transitions de phase se fonde sur une analyse variationnelle du potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$  (section 6.1), si bien que la cinétique de changement de phase serait l'analogue des scénarios de transitions énergétiques fournis par le modèle TIMES par minimisation du coût total actualisé du système.

Les transitions de phase peuvent être identifiées dans des contextes très différents et les modèles associés ont été utilisés dans de nombreux domaines en dehors de la physique. Ainsi, la transposition du traitement statistique des transitions de phase aux sciences humaines et sociales a été très tôt explorée notamment par SCHELLING (1978). BALL (2004) met en évidence le rôle des transitions de phase dans l'émergence de phénomènes collectifs en sciences sociales, tels que la dynamique du vote, les embouteillages et les ségrégations culturelles au sein des populations humaines. Nous pouvons également citer son utilisation en marketing (NADAL et GORDON, 2005) et en économie (BORNHOLDT et WAGNER, 2002; HORS, 1995). SOLÉ (2011) présente d'autres exemples d'application, y compris en biologie : propagation d'épidémies, réseaux de gènes et dynamique virale. On peut trouver de nombreux autres cas dans les domaines de l'écologie (SCHEFFER et CARPENTER, 2003; BARNOSKY et al., 2012), de la théorie des jeux (HELBING et LOZANO, 2010) et de la cosmologie (SCHULMAN et SEIDEN, 1986). SCHEFFER (2009) présente lui aussi de nombreux exemples de transitions « critiques » qui ont eu lieu dans des domaines allant de l'écologie aux sociétés humaines. Tous ces modèles impliquent un grand nombre d'acteurs ou d'éléments pour lesquels on souhaite analyser une rupture dans leur comportement moyen. Malgré la nature locale des interactions entre les agents individuels et l'absence de coordination globale, on peut observer l'émergence de comportements collectifs en tant que transitions de phase.

Une fois que des phases d'un système sont identifiées et que l'existence d'une transition est attestée, se pose la question de la cinétique du changement. S'inspirant des travaux autour de la criticalité auto-organisée (BAK, TANG et WIESENFELD, 1987)<sup>1</sup>, la théorie des cycles adaptatifs considère que les systèmes vivants suivent un cycle de 4 phases : exploitation ( $r$ ), consolidation ( $K$ ), destruction ( $w$ ) et ré-

1. La criticalité auto-organisée est une propriété de certains systèmes dynamiques qui s'organisent autour d'un point critique. Les caractéristiques de leur comportement sont similaires aux propriétés du point critique des transitions de phase (invariances d'échelle temporelle ou spatiale).

organisation ( $x$ ). Les deux phases de croissance sont donc suivies par deux autres phases qui réorganisent le système. DANGERMAN et SCHELLNHUBER (2013) proposent en se basant sur cette théorie ainsi que sur les travaux concernant les cycles économiques de Kondratiev (KONDRATIEV et STOLPER, 1935)<sup>2</sup> une transformation des systèmes énergétiques pour aller vers plus de renouvelables grâce à une modification du corpus législatif qui permettrait d'éviter le *carbon lock-in*.

Dans le domaine de l'économie, l'économiste et mathématicien GEORGESCU-ROEGEN (1971) a essayé de proposer une nouvelle approche de la discipline économique en s'inspirant de la thermodynamique. La théorie économique s'est en effet inspirée de la physique du 17<sup>ème</sup> siècle, notamment de la mécanique où le temps est réversible, et elle n'a pas su prendre en compte les avancées de la physique en thermodynamique où une flèche du temps<sup>3</sup> apparaît avec l'énoncé du second principe<sup>4</sup>. En effet, l'énergie (du point de vue de la physique) se conserve et la transformation de l'énergie utile en énergie thermique, c'est-à-dire la dégradation de la qualité de l'énergie utile, s'accompagne d'une création d'entropie. L'absence de prise en compte de ces limitations entropiques des processus économiques ne permet pas de bien représenter la question des ressources naturelles dans la production économique (POTTIER, 2014, Chap. 2). La voie ouverte par Georgescu-Roegen a donné naissance au courant de l'économie écologique mais n'a pas été exploitée par les économistes conventionnels. Certains chercheurs tentent encore aujourd'hui de s'inspirer de la physique pour mieux appréhender les processus économiques (KING, 2019; HERBERT et al., 2018).

À l'aune de ces nombreux travaux, il nous a donc paru judicieux de nous inspirer à notre tour des domaines de la physique statistique et de la thermodynamique. Dans une première partie, nous revenons sur les principaux éléments conceptuels utilisés en physique pour décrire les phénomènes de transition de phase. Dans une seconde partie, nous présentons une première analogie entre transition énergétique et transition de phase ainsi que sa mise en œuvre avec des modèles d'optimisation. Dans une dernière partie, nous approfondissons cette analogie pour présenter un modèle épuré. Nous discuterons alors des approches d'élaboration de scénarios qui permettent de proposer une stratégie de transition pertinente pour aller vers un monde bas-carbone.

---

2. La théorie de Kondratiev a notamment inspiré l'économiste Schumpeter pour ses travaux sur la destruction créatrice et l'innovation (SCHUMPETER, 1939).

3. La flèche du temps désigne le fait que le temps s'écoule toujours dans le même sens, voir VILLANI (2010) pour les liens avec l'entropie.

4. L'entropie d'un système isolé ne peut que croître.

## 6.1 ÉLÉMENTS DE LA PHYSIQUE DES TRANSITIONS DE PHASE

En physique, une transition est provoquée par la variation continue d'une variable d'état qui entraîne un changement discontinu d'un paramètre macroscopique du système considéré et donc de ses propriétés. Une phase est définie comme une partie homogène, aux propriétés physiques uniformes, qui est physiquement distincte des autres phases du système auquel elles appartiennent. Lors d'une transition de phase, le système passe d'une phase à une autre, chacune ayant des propriétés spécifiques. S'il y a coexistence des deux phases, on peut observer une surface définie comme frontière à l'instar de l'exemple traditionnel de la transition liquide-vapeur de l'eau.

D'abord abordée à travers le développement de la thermodynamique, l'étude des transitions de phase a été enrichie par l'apport de la physique statistique. Celle-ci a pour objet l'étude du comportement macroscopique de systèmes complexes composés d'un grand nombre d'éléments en interaction pour lesquels on doit renoncer à une description déterministe. L'intérêt de s'appuyer sur ce cadre théorique réside dans la simplification de la description du système considéré postulant qu'il n'est pas nécessaire de décrire précisément les détails d'un système pour comprendre son comportement.

## 6.1.1 Équilibre thermodynamique

Pour contourner l'impossibilité de procurer une évolution déterministe à un système complexe (c'est-à-dire faisant intervenir un nombre très grand de degrés de liberté, typiquement de l'ordre du nombre d'Avogadro en physique), une description statistique est adoptée. L'information manquante sur le système est donnée par l'entropie de SHANNON (1948) :

$$S = S(\mathcal{P}) = -k \sum_i \mathcal{P}(\omega_i) \ln \mathcal{P}(\omega_i) \quad (k > 0) \quad (6.1)$$

où :

- $\mathcal{P}$  est la distribution de probabilité,
- $k$  est la constante de Boltzmann,
- $\omega_i$  est la configuration du système, l'indice  $i$  décrit l'ensemble des configurations réalisables.

Le postulat statistique<sup>5</sup> consiste à maximiser l'entropie du système par rapport à la connaissance macroscopique dont dispose l'opérateur extérieur (JAYNES, 1957; BRILLOUIN, 1956). En d'autres termes, tout autre postulat conduirait à admettre une hypothèse supplémentaire

5. On adopte ici directement le point de vue de l'ensemble « grand-canonique ». Dans l'ensemble « micro-canonique », le postulat statistique énonce l'équiprobabilité des configurations de même énergie.

qui, par construction, serait abusive. Dans ces conditions, pour chaque réalisation macroscopique  $\mathcal{A}_r$  connue de l'observable  $A_r$ ,

$$\mathcal{A}_r = \sum_i \mathcal{P}(\omega_i) A_r(\omega_i) \quad (6.2)$$

les multiplicateurs de Lagrange  $\lambda_r$  sont introduits pour former la fonction de partition :

$$Z(\lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots) = \sum_i \exp \left( - \sum_r \lambda_r A_r(\omega_i) \right) \quad (6.3)$$

La statistique de Boltzmann-Gibbs  $P$  réalise le maximum de l'entropie (Équation 6.1) en respectant les contraintes macroscopiques de l'Équation 6.2 :

$$P(\omega_i) = \frac{\exp(-\sum_r \lambda_r A_r(\omega_i))}{Z(\dots, \lambda_r, \dots)} \quad (6.4)$$

Réciproquement, les multiplicateurs de Lagrange  $\lambda_r$  définissent complètement la statistique de Boltzmann-Gibbs (Équation 6.4). L'entropie du système  $S(P)$ , qui majore la fonctionnelle de l'entropie  $\mathcal{S}$ , vérifie le principe variationnel :

$$\mathcal{S} \leq S \equiv S(P) = k \left( \ln Z + \sum_r \lambda_r \langle A_r \rangle \right) \quad (6.5)$$

où  $\langle A_r \rangle$  est la moyenne macroscopique de l'observable  $A_r$  associée au paramètre de Lagrange  $\lambda_r$  procurée par le postulat statistique (Équation 6.4) :

$$\langle A_r \rangle = \sum_i P(\omega_i) A_r(\omega_i) = - \frac{\partial \ln Z}{\partial \lambda_r} \quad (6.6)$$

On retrouve la thermodynamique classique en considérant qu'un système physique est au moins connu par son énergie moyenne  $\langle E \rangle$ , usuellement appelée énergie interne (GARRETT, 1991). Son multiplicateur de Lagrange définit la température  $T = \frac{1}{k\lambda_1}$  où  $k$  est la constante de Boltzmann<sup>6</sup>. Puis, les autres moyennes macroscopiques sont associées à un ensemble de potentiels (dits chimiques) :

$$\alpha_r = - (kT) \lambda_r \quad (6.7)$$

si bien que l'inégalité 6.5 peut être remplacée par :

$$\mathcal{G} = \mathcal{E} - \sum_r \alpha_r \mathcal{A}_r - TS \geq -kT \ln Z = G(T, \dots, \alpha_r, \dots) \quad (6.8)$$

avec  $\mathcal{E}$  l'espérance de l'hamiltonien du système pour la distribution de probabilité  $\mathcal{P}$ .

6. Pour assurer la convergence de la fonction de partition (6.3), la température doit être positive si les niveaux d'énergie sont non-bornés positivement.

Par analogie avec un puits d'énergie potentielle, le membre de gauche de l'inégalité 6.8 définit le potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$  : c'est une fonctionnelle presque toujours convexe, opérant sur l'ensemble des densités de probabilité. Plus précisément, la perte de la propriété de convexité permet de définir l'existence de transitions de phase. Le minimum du potentiel correspond à l'enthalpie libre  $G$  (ou énergie libre de Gibbs) et est obtenu pour la statistique de Boltzmann-Gibbs. C'est une fonction concave par rapport à chacune de ses variables puisque :

$$\frac{\partial^2 \ln Z}{\partial \lambda_p \partial \lambda_q} = \langle A_p A_q \rangle - \langle A_p \rangle \langle A_q \rangle > 0 \quad (6.9)$$

On peut noter que l'enthalpie libre  $G$  s'identifie à l'énergie libre (ou énergie libre de Helmholtz) dans le cas où la seule grandeur macroscopique connue est l'énergie moyenne du système  $\langle E \rangle$  et le postulat statistique s'exprime dans l'ensemble canonique.

Un état d'équilibre thermodynamique peut être vu comme une compétition entre :

- une énergie d'ordre correspondant aux interactions du système  $\mathcal{E}$  et de ses couplages  $\alpha_r \mathcal{A}_r$  avec des réservoirs extérieurs suffisamment robustes pour maintenir la grandeur macroscopique  $\langle A_r \rangle$  grâce à la consigne  $\alpha_r$ ,
- une énergie de désordre  $-TS$  induite par la croissance naturelle de l'entropie du système en contact avec le thermostat à la température  $T$ .

Grâce à l'Équation 6.6, il est possible de calculer l'ensemble des grandeurs macroscopiques caractérisant le système pour exprimer la différentielle de l'enthalpie libre :

$$dG = - \sum_{r>1} \langle A_r \rangle d\alpha_r - SdT + \mathbf{F}d\mathbf{X} \quad (6.10)$$

le dernier terme correspondant au travail reçu par le système par la modification de ses conditions aux limites  $\mathbf{X}$  sous l'effet de la force  $\mathbf{F}$  exercée par l'opérateur extérieur.

Ainsi introduite, l'enthalpie libre possède des propriétés remarquables :

- c'est une fonction homogène de degré 1 par rapport aux opérations de duplication du système<sup>7</sup> : rapportée au volume du système, elle définit naturellement une densité et ses variables sont toutes intensives,
- toute la connaissance macroscopique sur le système s'obtient par dérivations successives.

7. Par exemple, lorsqu'on double le volume d'un système, l'enthalpie libre augmente d'un facteur 2<sup>1</sup>.

C'est la fonction d'état du système alors que la température et les potentiels chimiques sont ses variables d'état<sup>8</sup>.

### 6.1.2 Classification des transitions

Au-delà de sa mise en évidence par Curie et Langevin (CURIE, 1895; LANGEVIN, 1905), une première tentative de classification des transitions a été proposée par EHRENFEST (1933). Elle repose sur l'analyse du potentiel de Gibbs caractérisant un système physique et des discontinuités de l'enthalpie libre réalisant son état d'équilibre sous une variation continue d'une variable d'état. Chaque branche de l'enthalpie libre caractérise alors une phase stable. On distingue essentiellement :

- les transitions du premier ordre,
- les transitions du second ordre.

**Transitions du premier ordre** Les transitions du premier ordre sont associées à une discontinuité d'au moins une des dérivées premières de l'enthalpie libre à la température de transition  $T_c$ <sup>9</sup> (Figure 6.1). La discontinuité de l'entropie  $S$  du système s'accompagne d'une chaleur latente de transformation qui doit être fournie, à la ligne de transition, pour exhiber la phase de plus haute température :

$$L_{1 \rightarrow 2} = T_c (S_2 - S_1) = T_c \frac{\partial (G_1 - G_2)}{\partial T} \quad (6.11)$$

compte tenu de l'Équation 6.10.

Ce phénomène s'explique par la coexistence de phases macroscopiques correspondant à deux minima distincts du potentiel de Gibbs. L'existence d'états métastables<sup>10</sup> est alors envisageable dans un voisinage de la transition borné par les températures spinodales (DE FONTAINE, 1979) où une discontinuité de la grandeur macroscopique est observée. La barrière de potentiel qui s'oppose à la disparition de la phase 1 vers la phase 2 est donnée au premier ordre par :

$$\Delta G \simeq \frac{\partial (G_1 - G_2)}{\partial T} (T_{s2} - T_c) \quad (6.12)$$

où  $T_{s2}$  désigne la température spinodale à partir de laquelle la phase 1 ne peut plus présenter de métastabilité dans la phase 2 :

$$\Delta G \simeq L_{1 \rightarrow 2} \left( \frac{T_{s2}}{T_c} - 1 \right) \quad (6.13)$$

8. On retrouve ici la notion de variance, c'est-à-dire le nombre de paramètres intensifs indépendants susceptibles de définir complètement un système macroscopique à l'équilibre thermodynamique.

9. On note souvent mais abusivement avec l'indice  $c$  la température de transition du premier ordre puisqu'elle n'exhibe pas de phénomènes critiques (voir section 6.3).

10. La métastabilité désigne la propriété d'un système en apparence stable, mais qu'une perturbation suffisante peut faire passer à un état plus stable. Au-delà de la température spinodale, le système ne peut plus être métastable.

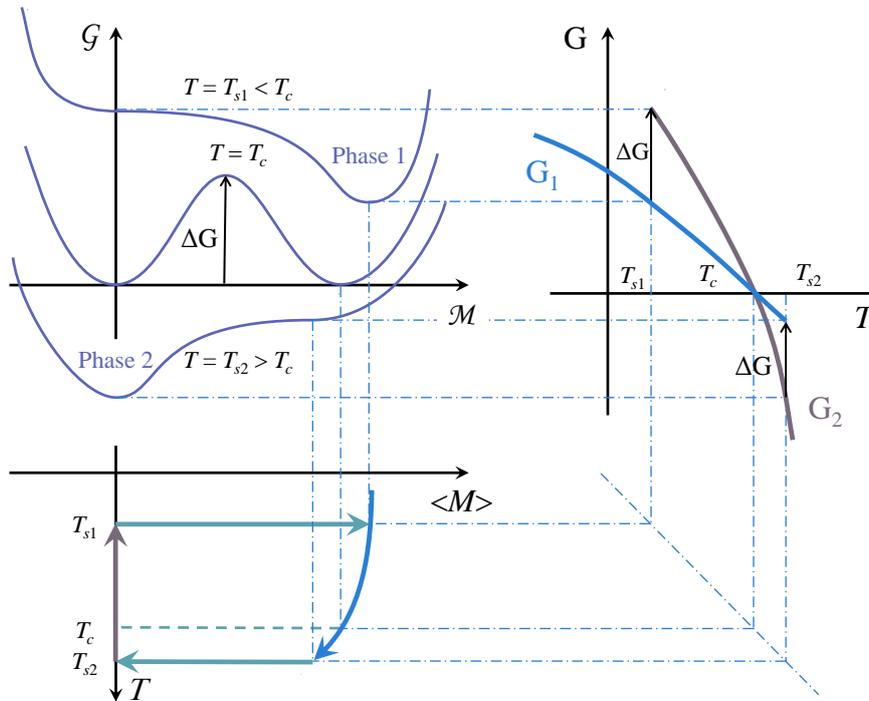


FIGURE 6.1 – Évolution du potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$ , de l'enthalpie libre  $G$  et de la température  $T$  pour des transitions du 1<sup>er</sup> ordre

En haut, à gauche : potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$  caractérisant le voisinage d'une transition de phase du premier ordre en fonction d'une grandeur macroscopique  $\mathcal{M}$  du système dont dérive la densité de probabilité (voir p.85-93, approximation de Bragg-Williams dans HÉRITIER, 2013b, chap.3). À chaque minimum est associée une branche d'enthalpie libre caractérisant une phase (en haut, à droite), chaque domaine métastable étant limité par sa température spinodale. En toute rigueur,  $G$  devrait être représenté en fonction de la variable d'état associée à  $\langle M \rangle$ , en l'espèce le champ extérieur, mais l'usage est d'utiliser la température pour privilégier les effets entropiques et le changement d'ordre. Le cycle d'hystérésis extrémal décrit par la grandeur macroscopique moyenne  $\langle M \rangle$  lors d'un cyclage de la température  $T$  est représenté en bas à gauche.

Les transitions du premier ordre sont à l'origine du phénomène d'hystérésis pour un cycle complet de la variable d'état. La chaleur dissipée au cours de ce cycle est donnée approximativement par :

$$L_{1 \rightarrow 2} \left( \frac{T_{s2} - T_{s1}}{T_c} \right) \quad (6.14)$$

Elle correspond à l'irréversibilité observée entre les chemins de transformation  $1 \rightarrow 2$  et  $2 \rightarrow 1$ .

**Transitions du second ordre** Une transition du second ordre s'accompagne d'une singularité<sup>11</sup> sur une des dérivées secondes de l'enthalpie libre. On observe alors soit un saut sur la chaleur spécifique (la dérivée de l'enthalpie libre par rapport à la température), soit une divergence. Sa principale caractéristique est que le potentiel de Gibbs exhibe un minimum absolu unique, quelle que soit la température (Figure 6.2); il n'y a donc pas de métastabilité. D'apparence plus simple dans la classification proposée par Ehrenfest, les transitions du second ordre ont permis de mieux comprendre le rôle crucial des fluctuations spatiales dans le mécanisme de transition et les brisures de symétrie qui lui sont associées.

L'enthalpie libre étant une fonction d'état homogène par rapport aux opérations de duplication du système, il est intéressant de représenter les domaines d'existence des différentes phases en fonction des variables d'état intensives. Le cas le plus connu est celui de l'eau (voir Figure 6.3). L'intérêt de cette représentation est de pouvoir situer les phases entre elles afin d'envisager leurs cinétiques de transformation ainsi que leur compétition.

Ce cadre est globalement suffisant pour identifier et localiser les transitions de phase. Par contre, il ne procure pas d'explication structurale de la transition et de ses mécanismes au voisinage de la ligne de transition où s'échangent qualitativement une énergie d'ordre et de désordre. Cette justification sera introduite par LANDAU (1937) afin de rendre compte de la modification de la symétrie du système. Nous reviendrons sur cet aspect dans la section 6.3.

## 6.2 ANALOGIE INSPIRÉE D'EHRENFEST

Dans cette partie, nous élaborons une première analogie à partir des éléments décrits dans la partie précédente pour réfléchir à la transition du système énergétique et à son pilotage.

---

11. On inclut ainsi les discontinuités et les comportements divergents.

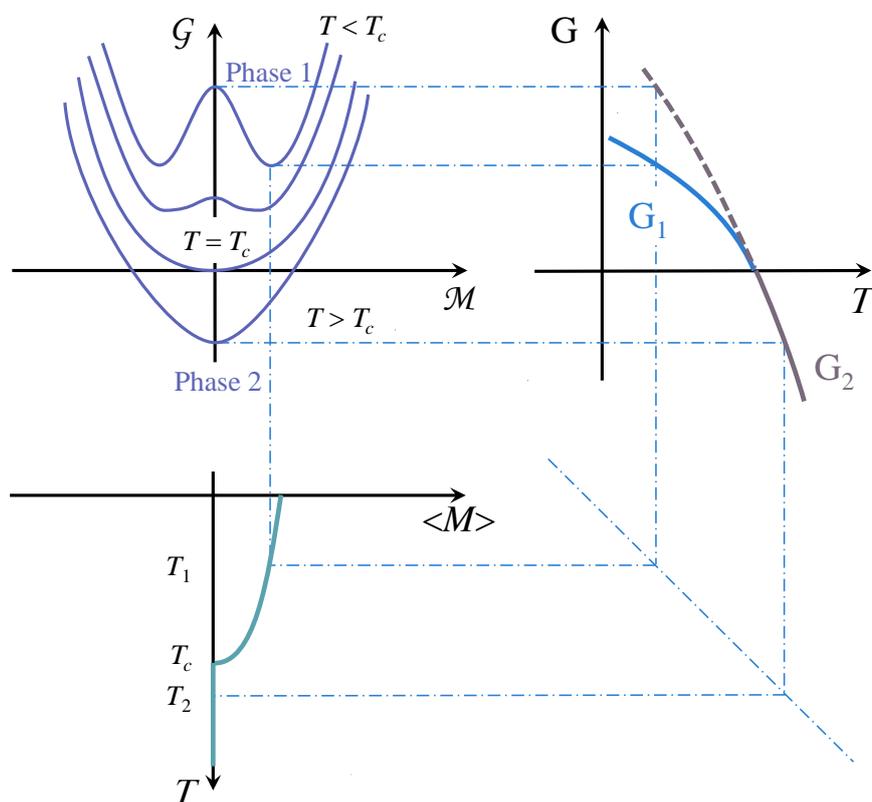


FIGURE 6.2 – Évolution du potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$ , de l'enthalpie libre  $G$  et de la température  $T$  pour des transitions du 2<sup>nd</sup> ordre

En haut, à gauche : potentiel de Gibbs  $\mathcal{G}$  caractérisant le voisinage d'une transition de phase du second ordre en fonction d'une grandeur macroscopique  $\mathcal{M}$  du système dont dérive la densité de probabilité (voir approximation de Bragg-Williams). Les deux branches d'enthalpie libre caractérisant chaque phase sont tangentes à la transition (en haut, à droite). Pour plus de précision, il est possible de prolonger la branche haute température en deçà de la transition pour caractériser une succession d'équilibre instable (pointillé). La grandeur macroscopique moyenne  $\langle M \rangle$  admet des variations continues à la transition, mais présente une tangente verticale (en bas, à gauche).

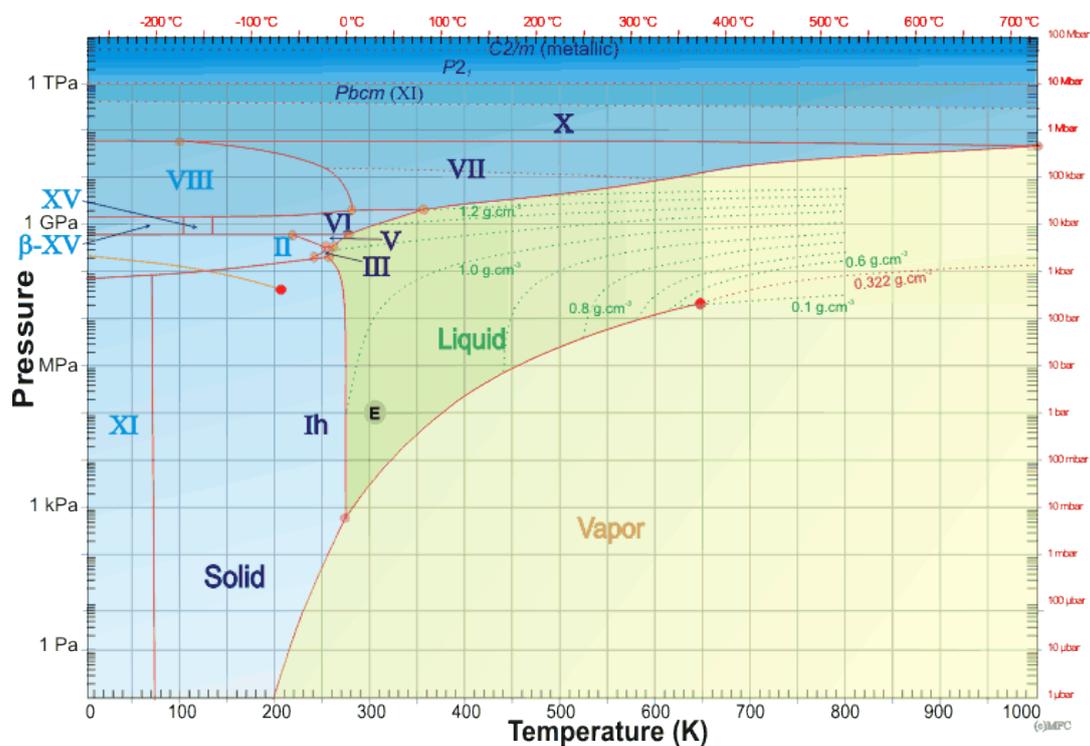


FIGURE 6.3 – Diagramme de phases de l'eau

Le diagramme est représenté sur un graphique à échelle logarithmique, en fonction de la pression et de la température. La grande variété de phases solides permet d'envisager plusieurs cinétiques de transformation à partir d'une variété allotropique de la glace donnée. De même, la transformation de la phase liquide à la vapeur peut franchir la ligne de transition (avec consommation de chaleur latente) ou contourner le point critique par la phase « fluide ».

Source : Martin Chaplin, [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_phase\\_diagram.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_phase_diagram.html)

## 6.2.1 Déclinaison de l'analogie

Des éléments utilisés pour analyser les transitions de phase en physique, nous souhaitons extraire ce qui explicitera l'analogie directe que nous avons identifiée entre ces phénomènes et la transition énergétique<sup>12</sup>. L'analogie que nous proposons conduit à identifier les correspondances récapitulées dans le [Tableau 6.1](#) entre transition de phase et transition énergétique. En physique, la transition entre deux états est possible si l'enthalpie libre est égale pour les deux phases. Pour la transition énergétique étudiée sous l'angle de l'optimisation, on considère que la transition est possible si on a une même valeur de la fonction objectif pour deux trajectoires appartenant à deux phases différentes.

TABLE 6.1 – Analogie inspirée d'Ehrenfest entre transition de phase et transition énergétique

	THERMODYNAMIQUE	SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE
Variables	Paramètres macroscopiques (au moins 1 extensif)	
<i>d'état (externes)</i>	P, T	Coût
<i>extensives (internes)</i>	V	Activité, capacité
État du système	<b>Une configuration du système définie par les paramètres macroscopiques</b>	<b>Une trajectoire du système énergétique constituée de mix énergétiques</b>
Potentiel	Potentiel de Gibbs	Coût total actualisé
Fonction d'état	Enthalpie libre	Minimum du coût total actualisé
Phase	<b>Branche régulière de l'enthalpie libre suivant la variation continue d'une variable d'état</b> Ensemble d'états avec des propriétés physiques macroscopiques uniformes car induites par la régularité de l'enthalpie libre	<b>Branche régulière du coût total actualisé</b> Trajectoires de mix énergétiques avec les mêmes caractéristiques (au moins le même niveau d'émission)
Transition	Discontinuité d'une dérivée de l'enthalpie libre	Discontinuité de la dérivée du minimum du coût total actualisé

12. Nous rappelons ici que la transition énergétique que nous décrivons est envisagée à travers le prisme du paradigme optimal mis en œuvre par notre modèle TIMES. Les trajectoires qui en découlent sont donc celles qui décrivent l'évolution du mix énergétique solution de TIMES.

Les premiers éléments de l'analogie développée nous ont conduit à nous poser la question du pilotage de la transition entre des trajectoires du système énergétique. La solution donnée par un problème d'optimisation de type TIMES correspond à une trajectoire du système énergétique sur un horizon de long terme. Lorsqu'aucune contrainte de réduction d'émissions n'est appliquée, on obtient un scénario de référence ou un scénario *Business as usual* (BAU). Parmi l'ensemble des solutions du problème d'optimisation, c'est-à-dire les sommets de l'espace des solutions, on repère une solution d'intérêt particulier, par exemple une solution qui minimise les émissions CO<sub>2</sub> sur la trajectoire<sup>13</sup> (min\_emi) avec un coût le moins élevé possible. Nous explicitons alors le passage de la trajectoire BAU à celle minimisant les émissions min\_emi. Pour cela, nous déterminons un ensemble de taxes et de subventions à appliquer à chaque technologie tout le long de la trajectoire temporelle.

### 6.2.2 Détermination du profil de taxes et subventions

Afin de simplifier les notations, on considère que notre problème d'optimisation de départ (assimilé à la formulation du problème pour TIMES) est le suivant :

$$\begin{aligned} \min CX & & (6.15) \\ \text{s.c. } BX \leq A & \end{aligned}$$

avec

$$X = \begin{bmatrix} \vdots \\ x_i \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \vdots \\ a_j \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \vdots & & \\ \dots & b_{j,i} & \dots \\ \vdots & & \end{bmatrix}, \quad C = [\dots \quad c_i \quad \dots]$$

Les contraintes actives d'une solution ont pour coefficient  $b_{j,i}$  avec  $i$  faisant référence à la variable de décision  $x_i$  (on considère que  $x_i$  dépend du temps mais par abus on ne notera pas la dépendance en  $t$ ), et  $j$  faisant référence à la  $j^{\text{ème}}$  contrainte active.

La méthode développée repose sur trois étapes :

1. Résolution du BAU :

La résolution du problème optimal pour la fonction objectif initiale (6.15) conduit à la solution BAU donnée par la trajectoire des variables  $x_i$ .

2. Identification du min\_emi :

---

13. Dans un souci de simplification du problème, on recherche les trajectoires qui conduisent à un minimum d'émissions d'un point de vue global (sur la trajectoire). Des variantes pourraient être faites où les solutions correspondraient à un minimum d'émissions pour la dernière année de l'horizon. Dans ce cas, l'ensemble des solutions admissibles serait considérablement plus long à explorer.

Pour trouver  $\min\_emi$ , on résout le problème d'optimisation (6.15) de départ avec une fonction objectif qui correspond à l'ensemble des émissions sur tout l'horizon temporel. La solution n'étant pas univoque (plusieurs technologies n'émettent pas de  $CO_2$ ), nous avons proposé une heuristique pour trouver l'ensemble des solutions associées à la fonction objectif minimisant les émissions (voir l'Annexe G pour plus de détails) et pour chacune de ces solutions, on identifie les contraintes actives.

Parmi toutes les solutions  $\min\_emi$  trouvées, c'est-à-dire qui sont équivalentes en matière d'émissions  $CO_2$ , on retient la solution de moindre coût, ce coût étant évalué avec la fonction objectif initiale (6.15).

3. Recherche du profil de taxes et de subventions permettant de transitionner entre BAU et  $\min\_emi$  :

On se propose d'élaborer une nouvelle fonction objectif, dérivant de (6.15) et dont l'optimum est la solution  $\min\_emi$ . Pour cela, on modifie les coefficients  $c_i$  de la fonction objectif (6.15) par un terme  $v_i$  afin que le gradient de la fonction objectif ainsi modifiée se retrouve dans le cône normal des contraintes actives trouvées dans l'étape 2, c'est-à-dire qu'elle soit une combinaison linéaire positive des contraintes actives de la solution<sup>14</sup>. Les coefficients des contraintes actives étant notés  $b_{j,i}$ , on notera la combinaison linéaire  $\sum_j \alpha_j b_{j,i}$ . Pour chaque variable  $x_i$ , on a :

$$\sum_j \alpha_j b_{j,i} = -(c_i + v_i) \text{ avec } \alpha_j \geq 0 \quad (6.16)$$

On définit ensuite un problème d'optimisation qui permet de déterminer les  $v_i$ . On choisit de minimiser la déviation à appliquer sur les coefficients initiaux  $\min \sum_i v_i^2$ . On peut ensuite rajouter des contraintes sur les coefficients  $v_i$ , par exemple sa positivité pour des variables  $x_i$  correspondant à des technologies émettant du  $CO_2$  (assimilée à une taxe) ou sa négativité pour des technologies neutre en  $CO_2$  (alors assimilée à une subvention). On cherche donc à résoudre un problème dont les variables sont :

- $\alpha_j$  : coefficient lié à la contrainte active  $j$
- $v_i$  : taxe ou subvention associée au coefficient de la variable  $x_i$

Le problème d'optimisation est :

$$\min \sum_i v_i^2 \quad (6.17)$$

sous les contraintes :

---

14. En effet, les conditions de Karush–Kuhn–Tucker indiquent que le gradient de la fonction objectif d'une solution optimale doit être dans le cône du gradient des contraintes actives.

- contrainte du cône des contraintes actives : (6.16)
- autres contraintes sur les  $v_i$  : par exemple,  $v_i \geq 0$  pour les technologies  $i$  émettant du  $\text{CO}_2$

On réitère cette recherche pour tous les minimums d'émissions trouvés précédemment et on ne retient que la solution de moindre coût pour la fonction objectif initiale.

Nous allons détailler les deux approches explorées pour déterminer le profil de taxe à appliquer à chaque technologie.

**Approche 1** La première approche que nous avons appliquée est une méthode peu contraignante. La seule contrainte qui s'applique est donc (6.16), c'est-à-dire celle de se trouver dans le cône des contraintes actives. On résout donc le problème suivant :

$$\min \sum_i v_i^2$$

sous les contraintes :

- de positivité des coefficients  $\alpha_j$  :  $\alpha_j \geq 0$
- de se trouver dans le cône des contraintes actives :

$$\sum_j \alpha_j b_{j,i} = -(c_i + v_i)$$

**Approche 2** La seconde approche explorée consiste à rajouter des contraintes sur les  $v_i$ , en précisant que pour les technologies émettant du  $\text{CO}_2$ , on souhaite des taxes et pour le cas inverse, des subventions. On cherche à résoudre le problème suivant :

$$\min \sum_i v_i^2$$

sous les contraintes :

1. de positivité des coefficients  $\alpha_j$  :  $\alpha_j \geq 0$
2. de se trouver dans le cône des contraintes actives :

$$\sum_j \alpha_j b_{j,i} = -(c_i + v_i)$$

3. de positivité pour les technologies émettant du  $\text{CO}_2$  :  $v_i \geq 0$
4. de négativité pour les technologies n'émettant pas du  $\text{CO}_2$  :  $v_i \leq 0$

La méthode a d'abord été testée sur des petits modèles d'optimisation simplifiés du système énergétique (voir [Annexe H](#) pour sa description) avant d'être appliquée à un modèle TIMES. On notera pour la suite que le modèle simplifié a les variables suivantes,  $t$  faisant référence à une technologie, et  $y$  à une année :

- $\text{prod}[t, y]$  : le niveau d'activité de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$  (c'est-à-dire la production associée à chaque technologie),
- $\text{capa}[t, y]$  : la capacité totale de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$ ,
- $\text{ncapa}[t, y]$  : la nouvelle capacité de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$ .

### 6.2.3 Résultats avec un modèle simplifié à 3 années et 3 technologies

Les données décrivant les technologies de ce modèle sont présentées en [Annexe I](#) ainsi que les valeurs exactes des résultats présentés par la suite.

Les solutions BAU et min\_emi sont représentées sur la [Figure 6.4](#) (voir [Tableau I.4](#) et [Tableau I.5](#) pour les valeurs exactes) et on a :

	BAU	min_emi
Coût M€	35 255	41 147
Émissions ktCO <sub>2</sub>	29 883	21 233

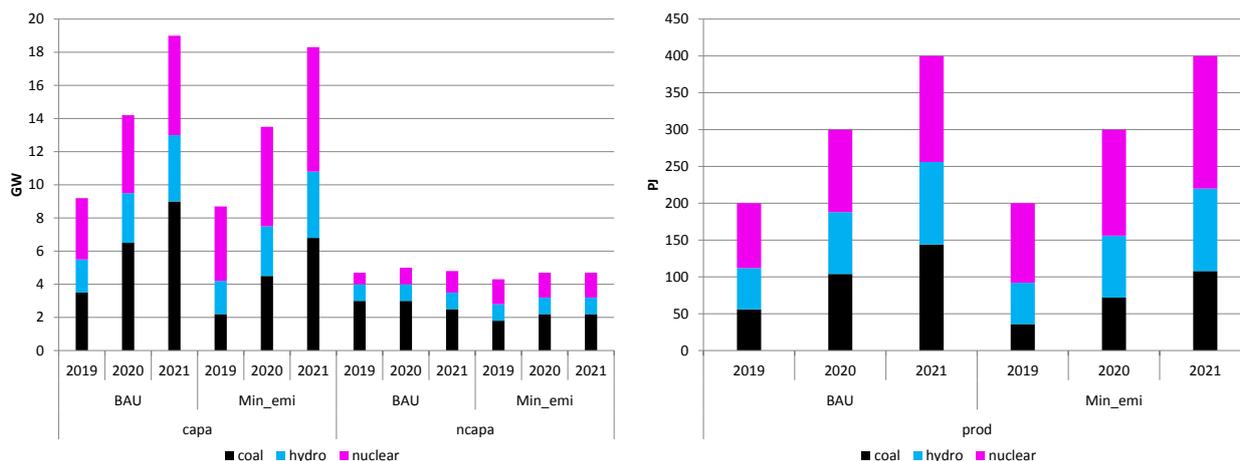


FIGURE 6.4 – Solution BAU et min\_emi pour un modèle simplifié à 3 technologies

**Approche 1** Avec la première approche, on obtient pour la solution min\_emi, le système de taxes et de subventions présenté sur la [Figure 6.5](#)<sup>15</sup>. Avec la fonction objectif modifiée par les taxes et les subventions, son nouveau coût total est de 34 859 M€. Ce coût est moins élevé qu'avec la fonction objectif initiale puisque les subventions diminuent les coûts et ne sont pas comptabilisées dans le coût total.

15. Voir [Tableau I.6](#) de l'[Annexe I](#) pour les valeurs, une valeur négative correspond à une subvention

Nous obtenons donc un profil de taxe et subventions qui nous permet de passer d'une trajectoire BAU à une trajectoire min\_emi. Pour observer cette transition, on fait varier linéairement selon un paramètre  $h$  ce système de taxes : à chaque valeur de  $h$ , on multiplie le profil trouvé pour obtenir min\_emi par le coefficient  $h$ .  $h$  joue ainsi le rôle d'une variable d'état. On trace l'évolution des émissions (Figure 6.6a) et l'évolution du minimum du coût total actualisé (Figure 6.6b). Le niveau d'émission d'une trajectoire nous permet en effet de caractériser la phase à laquelle appartient une trajectoire. Dans cet exemple, la variation est brutale et ne se produit que pour une valeur proche de 1, c'est-à-dire que tant que les valeurs exactes des taxes trouvées avec notre approche ne sont pas appliquées, le système reste sur la trajectoire BAU. En outre, cela correspond à un changement important de la pente du coût total actualisé.

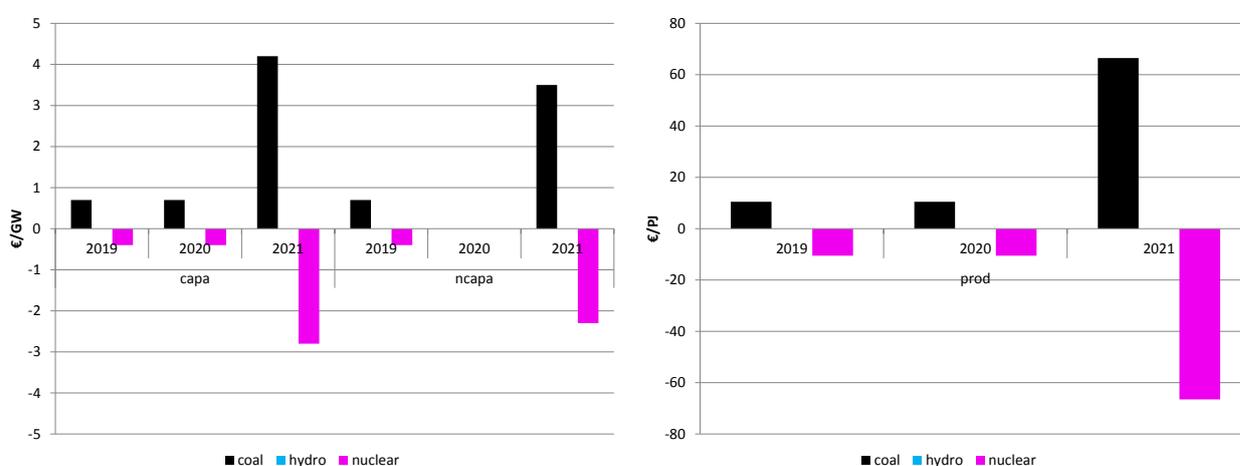
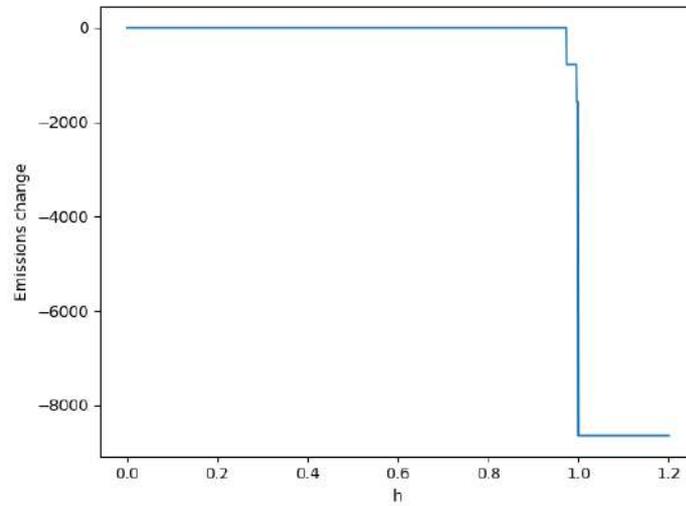
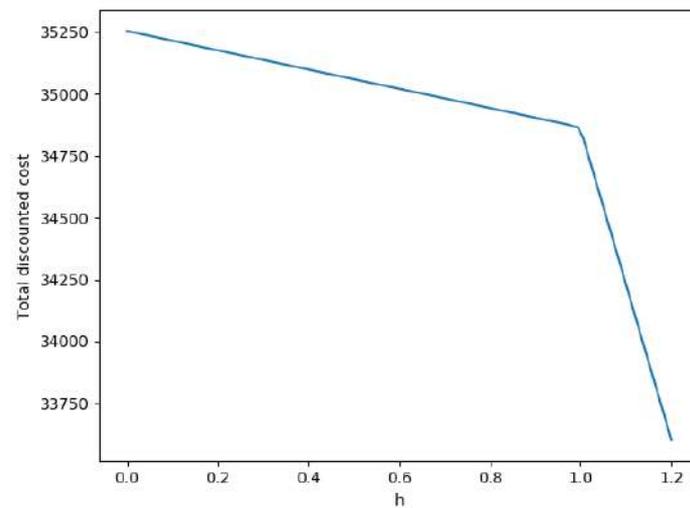


FIGURE 6.5 – Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 technologies avec l'approche 1

**Approche 2** Avec la deuxième approche, on obtient dans ce cas, les mêmes solutions car les  $v_i$  sont déjà du signe adéquat suivant l'émission associée à la technologie  $i$ . Dans l'exemple suivant, nous obtiendrons des différences dans les résultats.



(a) Variation des émissions en fonction de  $h$  pour  $\min\_emi$



(b) Évolution du minimum du coût total actualisé en fonction de  $h$  pour  $\min\_emi$

FIGURE 6.6 – Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 3 technologies avec l'approche 1

Remarque : On retrouve sur la [Figure 6.6b](#) une rupture de pente à  $h = 1$  associée au saut des émissions observées sur la [Figure 6.6a](#).

## 6.2.4 Résultats avec un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies

Les données décrivant les technologies sont présentées en [Annexe J](#) ainsi que les valeurs exactes des résultats présentés par la suite. Les solutions BAU et min\_emi sont représentées sur la [Figure 6.7](#) et on a :

	BAU	min_emi
Coût M€	27 790	71 093
Émissions ktCO <sub>2</sub>	51 026	9 256

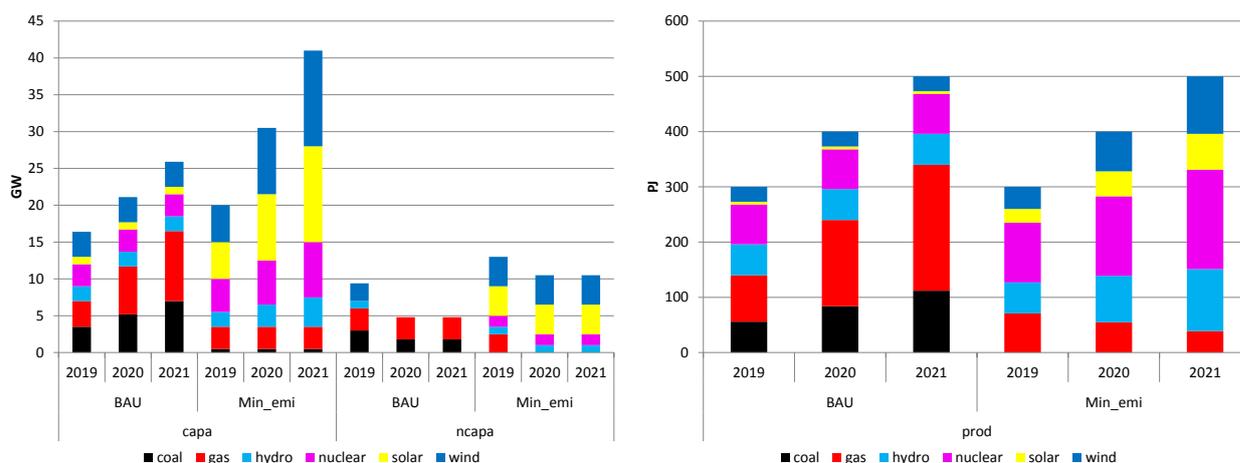


FIGURE 6.7 – Solution BAU et min\_emi pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies

**Approche 1** Avec la première approche, on obtient pour la solution min\_emi, le système de taxes et de subventions présenté sur la [Figure 6.8](#). Son coût total (qui prend en compte les subventions et les taxes) est de 49 386 M€. Nous obtenons donc un profil de taxe et subventions qui nous permet de passer d'une trajectoire BAU à une trajectoire min\_emi. Avec cette solution, des subventions sont accordées pour la technologie gaz pour certaines variables (capa) alors que des taxes sont appliquées la même année sur une autre variable (prod) ce qui justifie la seconde approche que nous avons adoptée.

Pour observer cette transition, on fait varier linéairement suivant  $h$  ce système de taxes et on trace l'évolution des émissions ([Figure 6.9a](#)) et l'évolution du minimum du coût total actualisé ([Figure 6.9b](#)). Dans cet exemple, les émissions descendent en escalier jusqu'à sa valeur finale pour  $h = 1$ . Cela signifie que de multiples transitions se produisent entre le BAU et le min\_emi. Dans cet exemple, les variations de pente du coût total actualisé sont plus progressives que dans l'exemple précédent.

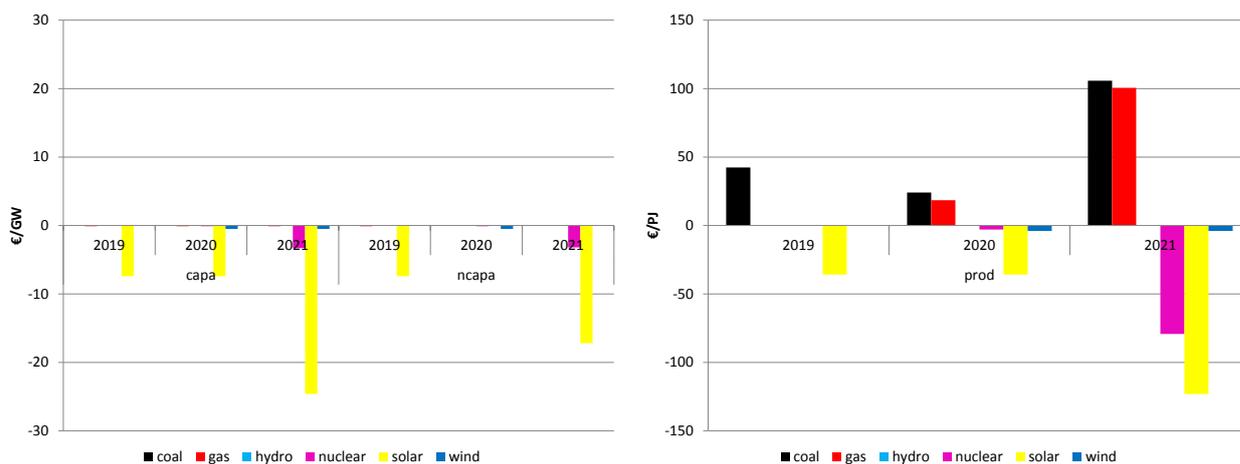


FIGURE 6.8 – Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 1

**Approche 2** Avec cette approche, on interdit les subventions pour les technologies émettant du  $\text{CO}_2$  et les taxes pour celles n'en émettant pas. On obtient alors pour trouver le  $\text{min\_emi}$  le système de taxes et de subventions présenté sur la Figure 6.10. Le coût total de la trajectoire est alors de 49 584 M€, légèrement plus élevé qu'avec la première approche. L'évolution des émissions (Figure 6.11a) ainsi que l'évolution du minimum du coût total actualisé (Figure 6.11b) en fonction de  $h$  sont très similaires à celles obtenues avec la première approche.

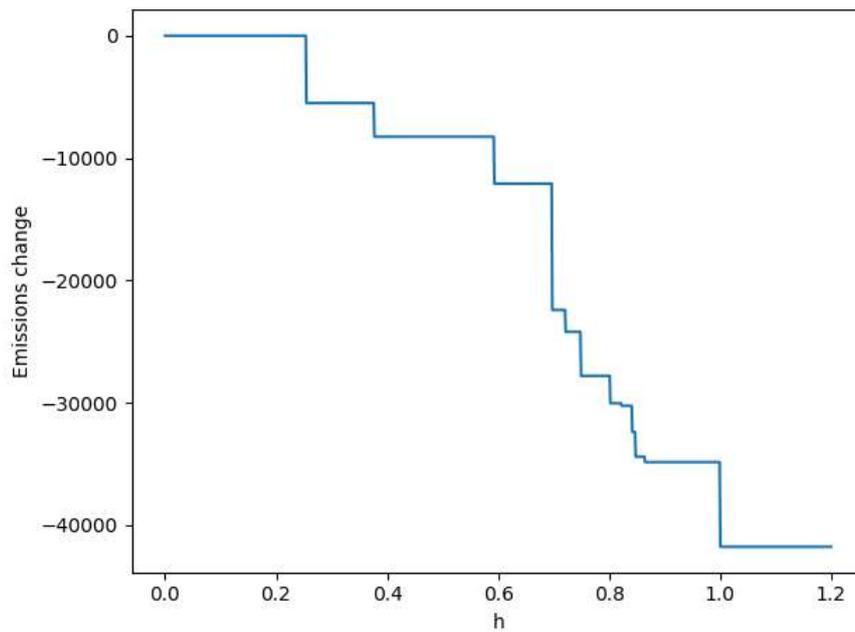
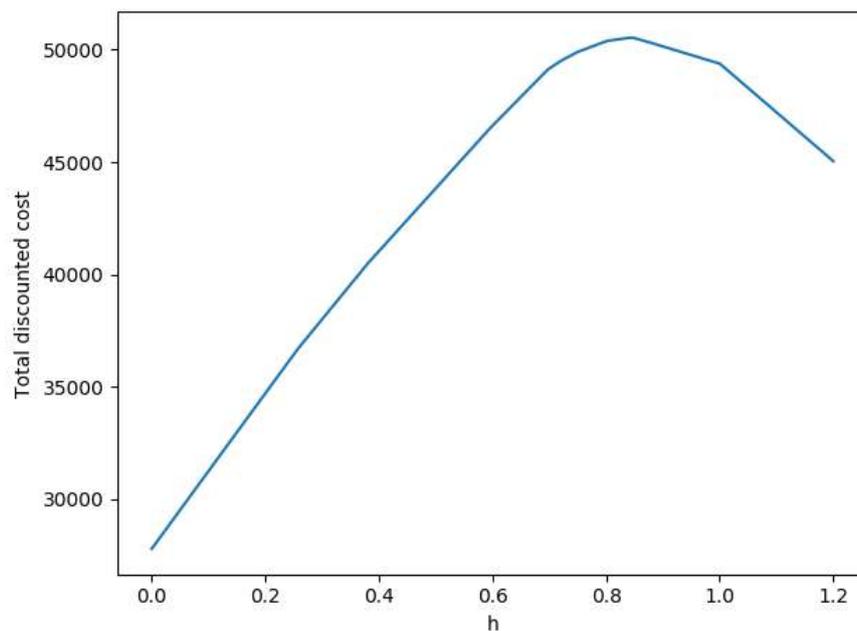
(a) Variation des émissions en fonction de  $h$  pour min\_emi(b) Évolution du minimum du coût total actualisé en fonction de  $h$  pour min\_emi

FIGURE 6.9 – Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 1

Remarque : Avec la multiplicité des sauts d'émissions sur [Figure 6.9a](#), les ruptures de pente sont peu visibles hormis celles de  $h = 0,82$  et  $h = 1$ .

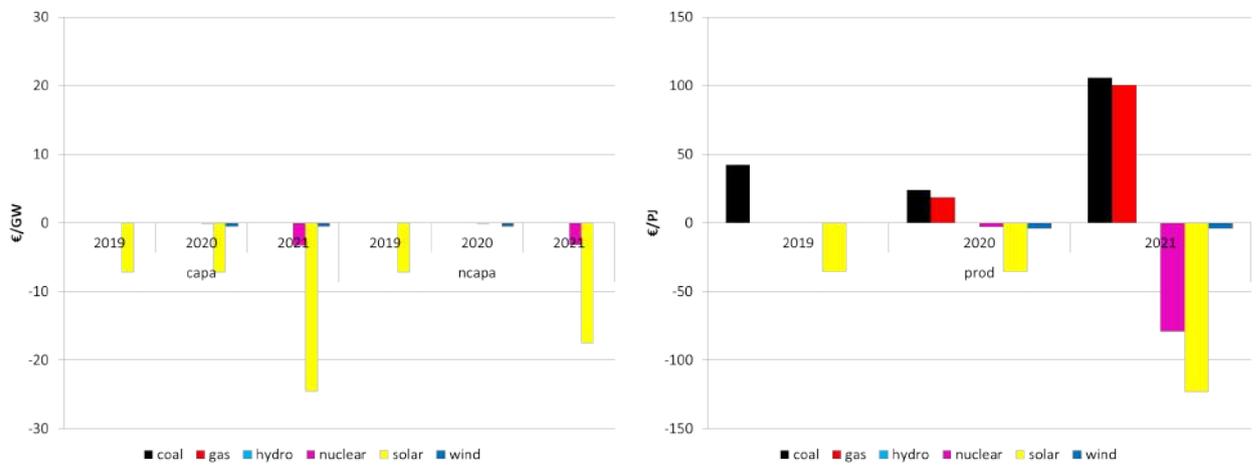


FIGURE 6.10 – Taxes et subventions pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 2

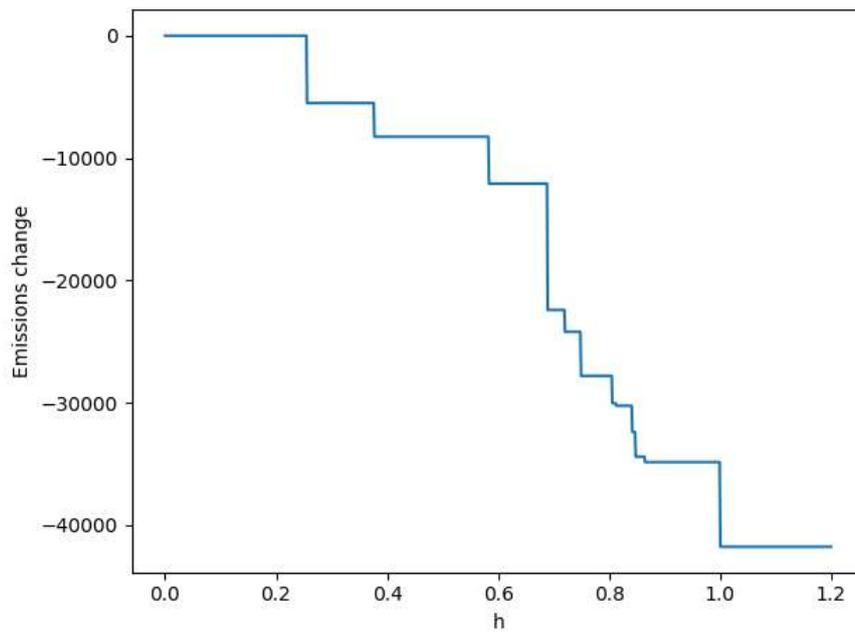
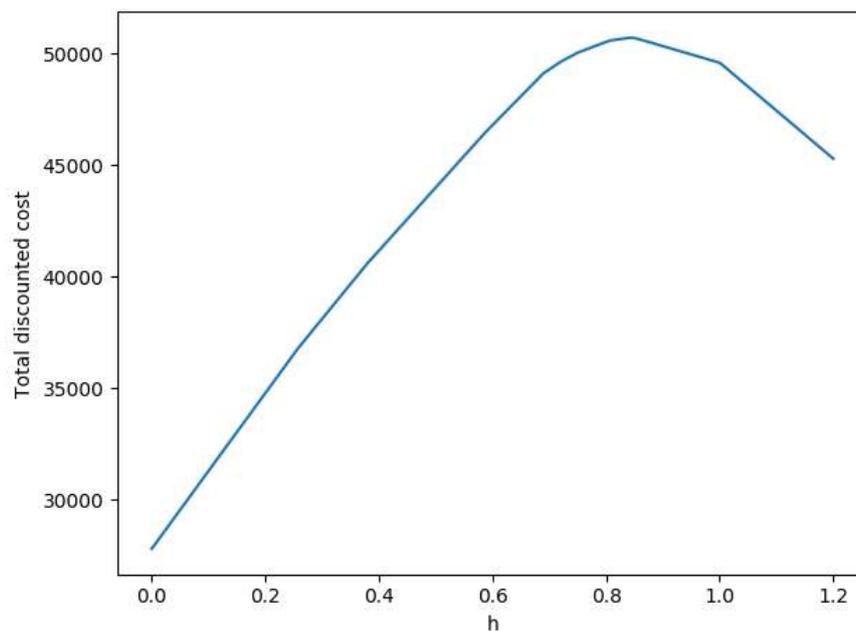
(a) Variation des émissions en fonction de  $h$  pour  $\min_{emi}$ (b) Évolution du minimum du coût total actualisé en fonction de  $h$  pour  $\min_{emi}$ 

FIGURE 6.11 – Résultats pour un modèle simplifié à 3 années et 6 technologies avec l'approche 2

Remarque : Avec la multiplicité des sauts d'émissions sur [Figure 6.11a](#), les ruptures de pente sont peu visibles hormis celles de  $h = 0,82$  et  $h = 1$ .

## 6.2.5 Résultats avec un modèle TIMES

Dans cette partie, on utilise un modèle TIMES simple dit de démonstration donc avec peu de variables. On a :

	BAU	min_emi
Coût Md€	2 940	3 220
Émissions MtCO <sub>2</sub>	20 389	13 897

Avec l'approche 1, on obtient un ensemble de taxes et de subventions dont la variation permet de tracer l'évolution des émissions par rapport au BAU dans la [Figure 6.12a](#). Le coût avec la nouvelle fonction objectif est de 2 253 Md€. Avec l'approche 2, on obtient le résultat présenté [Figure 6.13a](#). Le coût avec la nouvelle fonction objectif est de 2 134 Md€. De même que dans le cas précédent, les niveaux de taxe et de subventions proposées pour chacune des deux approches sont très similaires. Les valeurs des taxes et subventions associées ne sont pas présentées car la représentation graphique est difficile à fournir étant donné le nombre très élevé de variables (plus de 700 valeurs à renseigner).

Les évolutions des émissions et du coût total actualisé suivant  $h$  sont également semblables entre les deux approches. Concernant les émissions, on constate qu'il n'y a qu'un seul palier pour atteindre la valeur finale et on peut donc associer trois phases au système énergétique représenté par ce modèle TIMES : la phase du BAU, celle du palier et celle du min\_emi. Cependant, les changements de phase sont associés à des ruptures de pente du coût total actualisé très faibles.

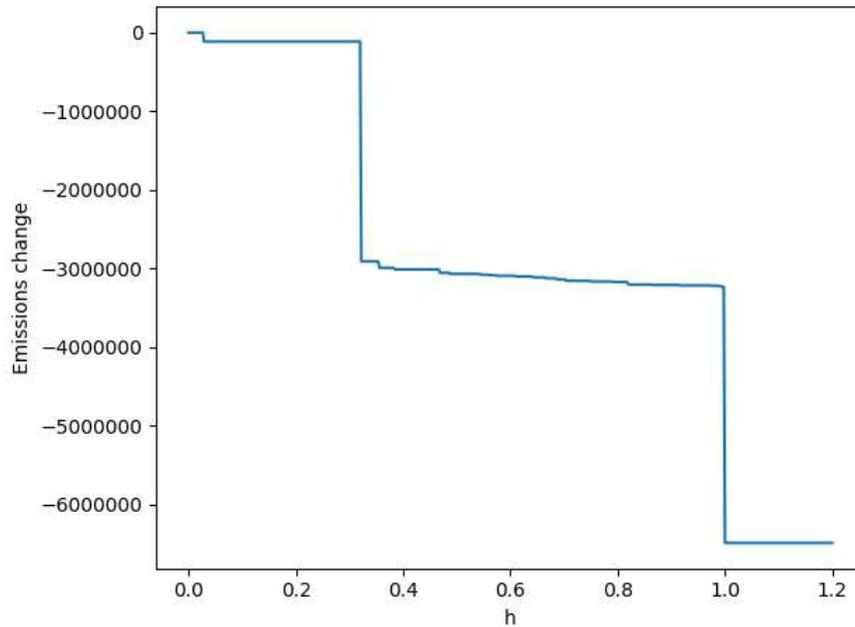
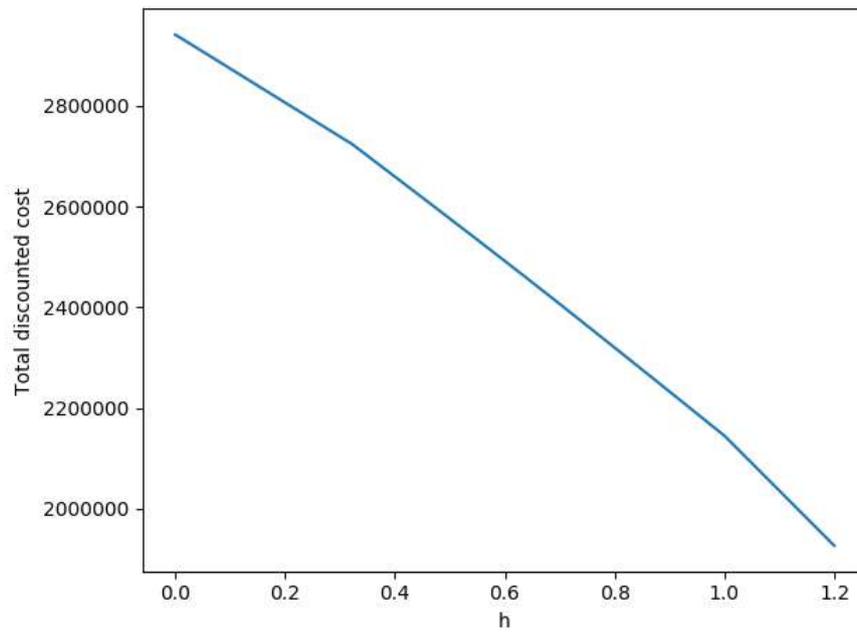
(a) Variation des émissions en fonction de  $h$  pour min\_emi(b) Évolution du minimum du coût total actualisé en fonction de  $h$  pour min\_emi

FIGURE 6.12 – Résultats pour un modèle TIMES avec l'approche 1

Remarque : On retrouve sur la [Figure 6.12b](#) des ruptures de pente à  $h = 0,3$  et  $h = 1$  associées aux sauts des émissions observées sur la [Figure 6.12a](#).

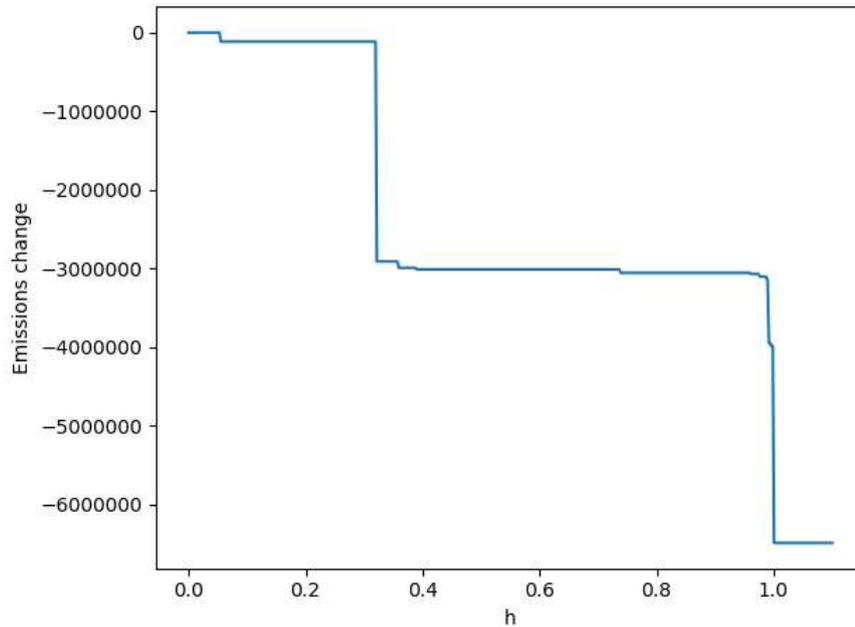
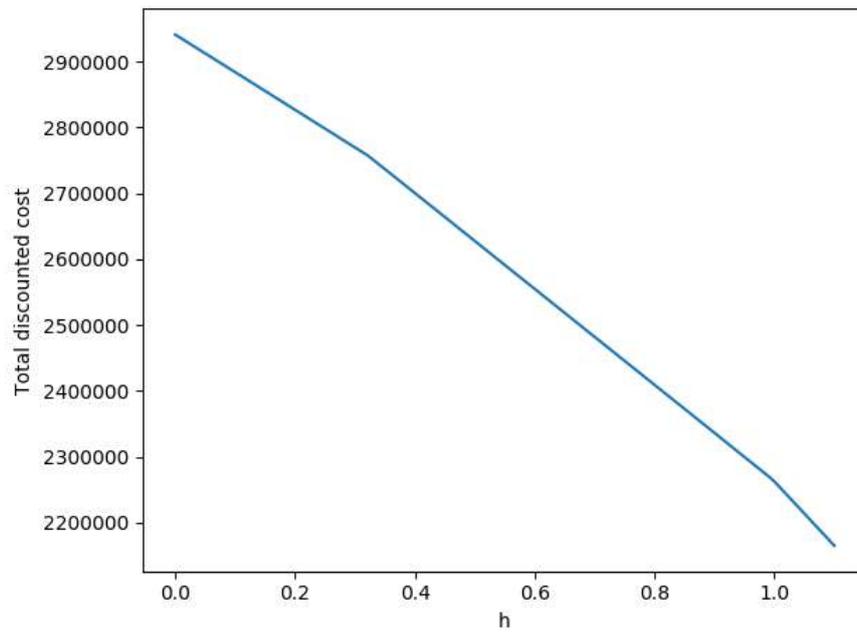
(a) Variation des émissions en fonction de  $h$  pour min\_emi(b) Évolution du minimum du coût total actualisé en fonction de  $h$  pour min\_emi

FIGURE 6.13 – Résultats pour un modèle TIMES avec l'approche 2

Remarque : On retrouve sur la [Figure 6.13b](#) des ruptures de pente à  $h = 0,3$  et  $h = 1$  associées aux sauts des émissions observées sur la [Figure 6.13a](#).

### 6.2.6 Conclusion

Notre analogie nous conduit à déterminer un profil de taxes et de subventions permettant le passage d'une trajectoire carbonée à une trajectoire décarbonée cible. Ainsi, depuis une trajectoire BAU, nous pouvons transitionner vers une nouvelle trajectoire  $\text{min\_emi}$  qui minimise les émissions grâce à une variable de contrôle  $h$  qui calibre le profil de taxes et de subventions à appliquer. La méthode développée présente plusieurs avantages :

- Le choix flexible de la trajectoire  $\text{min\_emi}$  : en effet, nous avons choisi de la définir en minimisant l'ensemble des émissions sur l'horizon temporel. D'autres critères peuvent être appliqués, comme la minimisation des émissions pour la dernière année ou tout autre critère pouvant être traduit dans une fonction objectif. Nous avons sélectionné parmi toutes les solutions satisfaisant la minimisation des émissions sur l'horizon temporel, celle de moindre coût avec la fonction objectif initiale. Là encore, un autre critère aurait pu être utilisé comme la maximisation d'installations renouvelables ou la minimisation du nucléaire parmi les trajectoires obtenues.
- La flexibilité dans la détermination des taxes et des subventions grâce au choix de nouvelles contraintes : on peut par exemple n'appliquer que des taxes ou que des subventions, on peut choisir d'appliquer des taxes ou des subventions uniquement sur certaines variables (par exemple sur  $\text{prod}$  mais pas sur  $\text{capa}$ ). Dans le problème d'optimisation associé à la détermination des  $v_i$ , on peut également utiliser une autre fonction objectif que (6.17), par exemple en minimisant une fonction pondérant les  $v_i$  suivant leur type de variable. La pondération peut être faite grâce à un paramètre de conversion entre les unités des activités et les unités des capacités <sup>16</sup>.
- La diversité du profil de taxes et de subventions : pour chaque solution  $\text{min\_emi}$  ayant même coût avec la fonction objectif initiale, on peut déterminer un ensemble de taxes et subventions pour transitionner. Il est alors possible de mettre en place un critère de choix pour discriminer les différentes solutions.

Cependant, ces avantages peuvent aussi constituer les limites de cette approche. Pour certains modèles avec des technologies retirant du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, une trajectoire de type  $\text{min\_emi}$  pourrait conduire à des niveaux d'émissions fortement négatifs. Il faudrait alors déterminer le budget carbone associé à la trajectoire que l'on voudrait atteindre ce qui implique une optimisation plus difficile à résoudre (contrainte égalité). Modifier les critères dans la détermination de la trajectoire visée ( $\text{min\_emi}$ ), par exemple en imposant uniquement un

16. Dans TIMES, il correspond à l'attribut CAP2ACT.

minimum d'émissions pour la dernière année peut considérablement allonger le temps de calcul. En particulier, pour un modèle de type TIMES, l'exploration des solutions avec l'heuristique développée est très longue, de même que l'étape de recherche du profil de taxes et de subventions. Enfin, les contraintes supplémentaires appliquées au problème de recherche du profil des taxes et subventions peuvent rendre le problème d'optimisation infaisable.

Par ailleurs, dans la structure du modèle TIMES-France, les technologies n'ont pas d'émissions associées car c'est la combustion des énergies qui émet du CO<sub>2</sub><sup>17</sup>. Pour mettre en œuvre cette approche dans ce modèle, il aurait donc fallu changer complètement la structure du modèle TIMES-France pour associer les émissions à une technologie. Enfin, il aurait fallu déterminer quelle technologie pouvait faire l'objet de taxes et de subventions : les gisements d'énergie renouvelable sont ainsi représentés dans le modèle comme des technologies qu'il aurait fallu différencier de l'ensemble des autres technologies. L'application d'une telle approche semble donc difficile pour un modèle de l'ensemble du système énergétique mais des exercices pourraient être menés pour des modèles plus sectoriels, se limitant au secteur de l'électricité ou celui du transport par exemple.

Bien que riche en enseignements, cette première approche inspirée de l'analogie avec la classification d'Ehrenfest donne à observer des éléments de transition mais il est difficile de comprendre quelle en est l'origine. Pour passer d'une trajectoire à une autre, il faut appliquer l'ensemble du profil de taxes et subventions sur tout l'horizon temporel. S'il est possible de passer continûment d'une trajectoire à une autre en faisant varier le profil de taxes et subventions associé, sa traduction concrète pour contrôler la transition au fil du temps n'est pas évidente. En effet, dans la réalité, il n'est pas possible de faire varier continûment un profil temporel de taxe : soit l'ensemble du profil est appliqué « d'un coup » pour changer de trajectoire, soit une partie du profil temporel ou un profil modifié est appliqué. Dans ce dernier cas, on obtient une trajectoire différente de celle visée.

Au-delà des discontinuités exhibées sur la fonction coût, il n'est pas possible de mettre en évidence des branches métastables, ni a fortiori un phénomène d'hystérésis, en raison du caractère linéaire de la modélisation adoptée. La transposition de la classification d'Ehrenfest au contexte énergétique est donc incomplète car elle ne procure pas de justification des mécanismes de transition. De plus, c'est une classification (et une observation) statique donc ne pouvant trouver son existence que dans les propriétés spatiales du système étudié.

Pour comprendre l'origine spatiale des transitions de phase, il faut revenir à la dégradation de l'énergie d'ordre opérée par la maximisation de l'entropie à l'équilibre thermodynamique ([sous-section 6.1.1](#)).

---

17. Pour simplifier, ce n'est pas la raffinerie qui émet du CO<sub>2</sub> mais la voiture consommant l'essence produite.

En d'autres termes, sous l'effet de la variation d'une variable d'état (en général la température), le nombre de configurations équiprobables peut croître jusqu'à ce que l'énergie de désordre  $TS$  dépasse la contribution de l'énergie d'ordre  $\langle E \rangle - \sum_r \alpha_r \langle A_r \rangle$ . Pour un système fini, cette évolution reste toujours régulière puisque la fonction de partition (6.3) n'invoque qu'un nombre fini de terme. Mais dans la limite thermodynamique<sup>18</sup>, l'enthalpie libre peut perdre son analyticité en un point définissant une transition de phase. Si ce n'est jamais le cas pour des systèmes à un corps (par exemple le gaz parfait, où il n'y a pas d'interaction entre molécules décrivant uniquement des trajectoires balistiques), ou pour des systèmes unidimensionnels (ISING, 1925), le phénomène de transition de phase a été exactement prouvé sur le modèle d'Ising à deux dimensions (ONSAGER, 1944), ouvrant ainsi un vaste champ de recherche de mise en évidence de l'universalité de ces phénomènes. Dans tous les cas où il se manifeste, le phénomène de transition de phase correspond à l'apparition de l'ordre à grandes distances induit par les interactions à courte portée (on parle de cohésion spatiale), ou à l'inverse, à sa destruction dans le cas de la mise en désordre<sup>19</sup>. On retrouve ainsi les éléments invoqués par le théorème ergodique (BIRKHOFF, 1931; SINAI, 1976) qui établit l'égalité des moyennes d'espace et des moyennes d'ensemble (6.6) dans la limite thermodynamique.

Ainsi, il apparait prometteur d'enrichir notre analogie en lui apportant :

- une interprétation spatiale du système énergétique sur lequel on pourra énoncer un postulat statistique,
- une description du mécanisme d'interaction justifiant une mise en cohésion à « courte distance » du système énergétique,
- un processus de dissipation, analogue à la création d'entropie,

et de l'éclairer, en dépit de ses limites pour quantifier les phénomènes critiques, par la théorie de Landau qui fournit un cadre suffisant pour justifier l'existence de transitions de phase. C'est l'objet de la section suivante.

---

18. La limite thermodynamique signifie que le nombre de particules (ou objets microscopiques en interactions) tend vers l'infini. Elle caractérise un système dont la croissance s'effectue de telle sorte que sa surface ait une contribution à l'énergie d'ordre arbitrairement petite par rapport à celle de son volume. Cela signifie donc que l'épaisseur de la surface devient arbitrairement petite à partir d'un certain volume.

19. Du point de vue statistique, une transition de phase est caractérisée par l'existence de deux (ou plus) statistiques de Boltzmann-Gibbs (6.4) définies comme les limites, dans la limite thermodynamique, de lois de probabilité conditionnées par l'ordre de la surface extérieure (DOBRUSHIN, 1969, 1968; DOBRUSCHIN, 1968; LANFORD et RUELLE, 1969; SINAI, 1982)

## 6.3 ANALOGIE INSPIRÉE DE LANDAU

## 6.3.1 De la classification de Landau aux phénomènes critiques : lois d'universalité

Une notion très féconde pour classer les transitions de phase fut introduite par LANDAU (1937) qui remarqua, pour quelques systèmes bien choisis, que le passage d'une phase à une autre lors d'une transition du second ordre au sens d'Ehrenfest (Figure 6.1) s'accompagnait d'un changement de symétrie : alors que l'état du système se modifie continûment, la symétrie exhibée par le système change brusquement pour que tous les éléments de symétrie de la phase de moindre symétrie se retrouvent dans la phase la plus symétrique. À ce changement de symétrie — on parle de brisure de symétrie —, Landau associe la notion de *paramètre d'ordre*, grandeur physique de caractère extensif :

- nul dans la phase la plus symétrique, le plus souvent haute température,
- non-nul dans la phase de moindre symétrie.

La classification phénoménologique de Landau distingue ainsi :

- les transitions pour lesquelles il n'est pas possible de définir un paramètre d'ordre : autrement dit, les groupes de symétrie des deux phases sont tels qu'aucun n'est strictement inclus dans l'autre. Ces transitions sont toujours du 1<sup>er</sup> ordre au sens d'Ehrenfest (Figure 6.2).
- les transitions avec paramètre d'ordre : le groupe de symétrie de la phase de moindre symétrie (ou phase ordonnée) est un sous-groupe de la phase la plus symétrique (phase désordonnée). Si le paramètre d'ordre est discontinu au point de transition, la transition sera du premier ordre (au sens de Landau), si le paramètre d'ordre est continu, elle sera du second ordre.

Alors que la transition du premier ordre permet la coexistence des deux phases, elles coïncident dans le cas du second ordre, si bien que la classification de Landau prolonge celle d'Ehrenfest en lui conférant un caractère spatial grâce à l'analyse des symétries des phases en présence. Dans les deux cas, le paramètre d'ordre, s'il peut être défini, procure la grandeur *relevante* sur laquelle s'exprime analytiquement le potentiel de Gibbs à l'origine de la transition. On est ainsi ramené aux discussions de la Figure 6.1 et la Figure 6.2, la grandeur notée  $\mathcal{M}$  jouant le rôle du paramètre d'ordre. L'usage note  $h$  sa variable conjuguée.

Il est possible de relier la fluctuation du paramètre d'ordre à l'équilibre thermodynamique (6.9) :

$$-kT \frac{\partial^2 G}{\partial h^2} = \langle M^2 \rangle - \langle M \rangle^2 \quad (6.18)$$

à sa susceptibilité :

$$\chi = -\frac{\partial \langle M \rangle}{\partial h} \quad (6.19)$$

pour obtenir grâce à (6.6) le théorème de fluctuation-dissipation :

$$kT\chi = \langle M^2 \rangle - \langle M \rangle^2 \quad (6.20)$$

Par ailleurs, une différentiation de la condition d'équilibre de  $\mathcal{G}$  pour des petites variation de  $h$  procure l'expression :

$$\frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \mathcal{M}^2} \Big|_{\langle M \rangle} \frac{\partial \langle M \rangle}{\partial h} + \frac{\partial}{\partial \mathcal{M}} \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial h} \right) \Big|_{\langle M \rangle} = 0 \quad (6.21)$$

soit compte tenu de (6.8) :

$$\chi = \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \mathcal{M}^2} \Big|_{\langle M \rangle}^{-1} \quad (6.22)$$

Ainsi, la fluctuation du paramètre d'ordre est conditionnée par la courbure du potentiel de Gibbs à l'équilibre thermodynamique. Alors que le régime de fluctuation avorte pour une transition de phase du premier ordre, l'annulation de la dérivée seconde du potentiel de Gibbs pour une transition du second ordre impose la divergence des fluctuations de paramètre d'ordre. Ce résultat constitue une contradiction, mentionnée par Landau lui-même, avec l'hypothèse qui consistait à réduire la dépendance de  $\mathcal{G}$  au seul paramètre d'ordre alors que ses fluctuations deviennent prépondérantes à la transition.

Après analyse spectrale spatiale (HÉRITIER, 2013a), le même type de calcul permet de montrer, en introduisant un terme de rigidité dans la fonctionnelle de Gibbs pour y pénaliser les fluctuations spatiales (fonctionnelle de Ginzburg-Landau), que la fonction de corrélation du paramètre d'ordre :

$$\Gamma(r - r') = \langle M(r) M(r') \rangle - \langle M(r) \rangle \langle M(r') \rangle \quad (6.23)$$

est bornée pour une transition du premier ordre mais diverge lors d'une transition du second ordre quel que soit  $|r - r'|$ , remettant en cause le choix d'une écriture *locale* de la fonctionnelle de Gibbs, en fait seulement pour des dimensions de l'espace  $D \leq 4$  (critère de Ginzburg).

Finalement, la théorie de Landau et plus généralement toutes les méthodes de champ moyen qui consistent à négliger a priori les fluctuations à partir d'un certain rang portent en elles une contradiction interne puisqu'elles prédisent précisément que, près du point critique, ces dernières deviennent prépondérantes. Il faut donc faire appel à des méthodes différentes pour considérer ce que l'on appelle les phénomènes critiques.

Cette théorie dépasse le cadre de cette description. Mais elle aboutit à l'idée qu'une transition de phase obéit à des *comportements universels* indépendants de la description microscopique du système étudié<sup>20</sup>. En particulier, on retiendra que les comportements universels concernent :

- les exposants critiques des différentes réponses du système,
- les fonctions (et longueur de corrélation),
- les équations d'état,

et sont essentiellement conditionnés par :

- la dimension de l'espace  $D$  (une dimension  $D$  élevée favorise l'existence de la transition et/ou la renforce),
- la dimension du paramètre d'ordre  $n$  (une dimension faible du paramètre d'ordre, à l'extrême discret comme le spin d'Ising, renforce les effets d'ordre donc l'existence d'une transition),
- la portée des interactions (une longue portée renforce la cohésion à grande distance donc les effets d'ordre),

réduisant considérablement la description nécessaire à l'étude d'un système en transition. C'est pourquoi nous proposons de compléter l'analogie du [Tableau 6.1](#) dans le [Tableau 6.6](#) par les hypothèses suivantes :

- Les systèmes énergétiques de même coût sont équiprobables<sup>21</sup>. L'étendue d'un système énergétique fait que ses sous-systèmes réalisent également cette hypothèse, de sorte que pour un coût donné, on puisse définir suffisamment de mix locaux pour justifier les opérations de moyenne statistique (théorème ergodique).

---

20. Outre les éléments déjà cités, les principales contributions à l'étude des phénomènes critiques ont été introduites successivement par :

- WIDOM (1965) qui émet l'hypothèse d'homogénéité de la partie singulière de l'enthalpie libre, c'est-à-dire responsable de la transition, au voisinage de la température critique.
- KADANOFF (1966) qui propose l'hypothèse de similarité, à savoir qu'à l'approche de la transition, il y a une invariance d'échelle des figures d'ordre entre la maille microscopique et la longueur de corrélation, c'est-à-dire une perte de la nature lacunaire et discrète de la structure microscopique. Ceci conduit à une forme particulière de l'enthalpie libre (forme de Widom) et à des relations entre exposants critiques appelées lois d'échelle. Il ouvre ainsi la voie à la théorie du groupe de renormalisation formalisée par :
- WILSON et KOGUT (1974) qui montrent que les exposants critiques caractérisant la transition s'obtiennent par des développements en  $\varepsilon = 4 - D$ . Par là même, ils montrent que le comportement prédit par les théories de champ moyen (dont Landau) devient exact en dimension  $D \geq 4$  (critère de Ginzburg), alors qu'en sous-estimant le rôle des fluctuations en dimension  $D \leq 3$ , il renforçait les phénomènes d'ordre donc l'existence et les discontinuités des transitions de phase.

21. Une hypothèse similaire concernant les trajectoires pourrait (sans doute) être formulée dans l'analogie précédente : les trajectoires de même coût seraient équiprobables en supposant qu'elles ont même point initial et même temporalité. Il faut que l'horizon temporel soit néanmoins compatible avec une évolution quasi-statique.

- Un effet de parc et d'apprentissage favorise un mix homogène (au moment du choix).

On adoptera dans la section suivante une approche « à la Landau » visant à renforcer la transition :

- système discret à deux niveaux ( $n = 1$ ),
- choix d'une dimension  $D$  suffisamment élevée ( $D \geq 4$ ) pour s'affranchir des effets dimensionnels et retrouver les comportements de champ moyen (critère de Ginzburg),
- barrière de potentiel identifiant la perte de capital à la chaleur dissipée à la transition (voir [Figure 6.15](#)).

TABLE 6.6 – Analogie entre transition de phase et transition énergétique

	THERMODYNAMIQUE	SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE
Variables	Paramètres macroscopiques (au moins 1 extensif)	
<i>d'état (externes)</i>	P, T	Coût
<i>extensives (internes)</i>	V	Activité, capacité
État du système	<b>Une configuration du système</b>	<b>Un mix du système énergétique</b>
	défini par les paramètres macroscopiques	
Potentiel	Potentiel de Gibbs	Coût total actualisé
Fonction d'état	Enthalpie libre	Minimum du coût total actualisé
Conversion	Travail	Coût des taxes et des subventions
Dissipation	<b>Chaleur latente</b>	<b>Investissement sacrifié</b>
Phase	<b>Ensemble d'états avec des propriétés physiques macroscopiques uniformes</b> (par ex. la symétrie) Au-delà, une interface entre deux phases en coexistence si elles existent (1 <sup>er</sup> ordre)	<b>Un ensemble de mix énergétiques</b> avec les mêmes caractéristiques (au moins le même niveau d'émission)
Paramètre d'ordre	Nul dans la phase désordonnée (haute symétrie) Non-nul dans la phase ordonnée (basse symétrie)	Émissions CO <sub>2</sub>
Transition	Locii de coexistence entre deux phases (hypersurface donnée par les mêmes énergies libres de Gibbs)	Locii de coexistence entre deux mix énergétiques
Cinétique	Au-delà, une trajectoire entre deux phases	

## 6.3.2 Déclinaison de l'analogie

On considère un problème d'optimisation associé à un système énergétique. Dans un premier temps, le système est simplifié pour pouvoir renforcer les phénomènes de transition. En effet, on considère que les éléments stochastiques (incertitudes sur les coûts par exemple) viendront amoindrir la singularité de la transition comme le produit la température dans un système physique.

Le système énergétique considéré est composé de deux technologies, l'une carbonée (1) et l'autre décarbonée (2). Leurs activités sont notées respectivement  $x_1$  et  $x_2$ . Le coût associé à chacune des activités est noté respectivement  $c_1$  et  $c_2$ . Ce coût comprend à la fois le coût variable et fixe de la technologie mais aussi l'investissement annualisé.

Le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min c_1 x_1 + c_2 x_2$$

sous les contraintes :

- $x_1 + x_2 \geq E$ ,  $E$  étant la demande en énergie
- $x_2 \leq X_2$  avec  $X_2 \leq E$ .

On choisit de poser  $X_2 \leq E$  pour dissymétriser le problème. Par ailleurs, on se limite aux solutions en tension sur la demande. Suivant les valeurs de  $c_1$  et de  $c_2$  (on se limite aux cas où  $c_1$  et  $c_2$  sont positifs), les solutions du problème d'optimisation sont (voir Figure 6.14) :

1. solution carbonée :  $(x_1 = E, x_2 = 0)$
2. solution décarbonée :  $(x_1 = E - X_2, x_2 = X_2)$

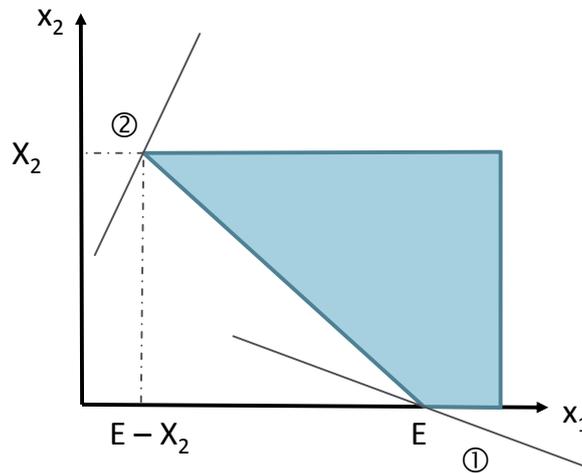
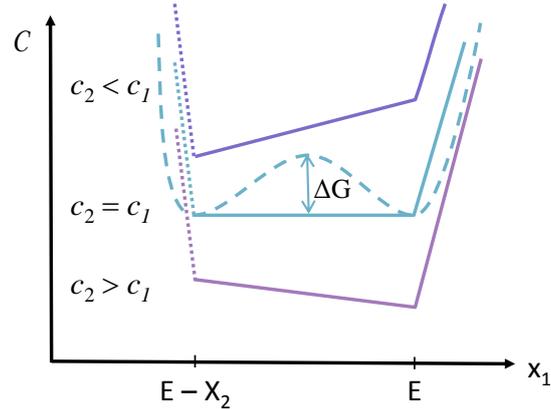


FIGURE 6.14 – Espace primal des solutions du problème d'optimisation

Le coût  $C$  du système énergétique, c'est-à-dire le minimum de  $C = c_1 x_1 + c_2 x_2$ , a le même rôle que l'énergie à minimiser dans les systèmes physiques (ou l'enthalpie libre pour un système thermalisé). La fonction coût  $C$  associée est représentée sur la Figure 6.15.

FIGURE 6.15 – Évolution de  $\mathcal{C}$  en fonction de  $x_1$ 

Remarque : la courbe en pointillés indique une représentation de la fonctionnelle de coût « à la Landau ». La barrière de potentiel  $\Delta G$  correspond à la valeur restante du capital investi dans la phase initiale. Cette barrière disparaît spontanément à la spinodale (voir Figure 6.1).

En s'inspirant de la représentation utilisée pour les transitions de phase en physique, on peut associer à notre problème d'optimisation sa forme duale et tracer un diagramme de phase (Figure 6.16). Suivant les valeurs de  $c_1$  et de  $c_2$ , le système se trouvera dans la phase carbonée ou la phase décarbonée.

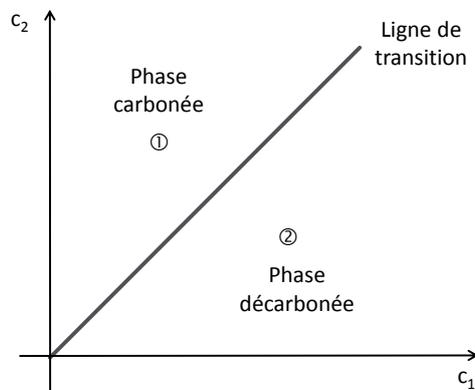


FIGURE 6.16 – Espace dual des solutions du problème d'optimisation

Remarque : on pourrait montrer que les spinodales carbonées et décarbonées sont confondues avec les axes.

La ligne de transition définie par  $c_1 = c_2$  sépare les deux phases du système énergétique. En particulier, si  $c_1 \leq c_2$ , alors le système est carboné. Dans le cas  $c_1 \geq c_2$ , le système est décarboné. Les spinodales indiquent la limite de métastabilité d'une phase dans l'autre (voir Figure 6.1).

Chaque année, le problème d'optimisation peut être reposé avec des coûts  $c_1$  et  $c_2$  qui varient. Suivant leur évolution, le système énergétique optimal appartient à la phase carbonée ou décarbonée. Le temps est noté  $t$ .

### Chemins de transition

Sur le diagramme de phase associé au problème d'optimisation, différents chemins de transition du système énergétique peuvent être explorés. En effet, pour se déplacer sur les différents points du diagramme de phase, le planificateur peut appliquer des taxes et des subventions sur les coûts  $c_1$  et  $c_2$  ce qui permet d'explorer différents chemins de transition.

On distingue deux stratégies (Figure 6.17) :

1. abrupte : on applique des taxes et/ou subventions brutalement pour aller dans l'autre phase
2. quasi-statique : on fait évoluer continûment les taxes/subventions jusqu'à la ligne de transition

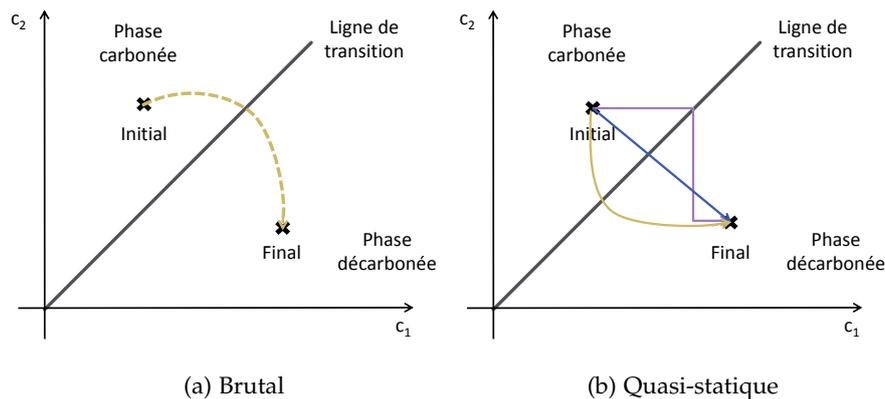


FIGURE 6.17 – Chemins de transition

### Mécanisme dissipatif

Les coûts initiaux, pour  $t = 0$ , des technologies (1) et (2) sont notés  $c_{1i}$  et  $c_{2i}$ . Admettons que nous ayons  $c_{1i} \leq c_{2i}$ , nous obtenons alors un système carboné.

Si les coûts évoluent de telle façon que nous ayons  $c_1 \geq c_2$ , alors le système optimal est un système décarboné. Cependant, les investissements qui ont été engagés dans la technologie  $x_1$  doivent être perdus ou « sacrifiés ». Pour passer dans une nouvelle phase, il faut consentir à « perdre » ces investissements et on introduit pour désigner cette perte la notion de chaleur.

Dans le cas d'une transition abrupte, cette perte correspond à la chaleur dissipée. Elle dépend du temps  $t_1$  à partir duquel le système

transitionne et de la durée de vie  $T_{life}$  des investissements, c'est-à-dire de la durée durant laquelle la technologie  $x_1$  ne fonctionnera pas au maximum des capacités qui ont été investies. Si on passe brutalement d'un point initial à un point final, elle vaut  $Q = c_{1i} X_2 (T_{life} - t_1)$  car la technologie  $x_1$  au lieu de produire  $E$  est passée à une production de  $E - X_2$  (Figure 6.18).

Dans le cas d'une transition quasi-statique, pour franchir la ligne de transition  $c_1 = c_2$  du diagramme de phase, on désigne la perte par la notion de chaleur latente notée  $L$ . C'est le franchissement de la ligne de transition qui introduit ce terme dissipatif qui s'apparente à la chaleur latente dans les transitions et donc à la création d'entropie. Cependant, contrairement à la physique des transitions de phase, le franchissement de la ligne dans le sens inverse ne permet pas de récupérer la chaleur latente, elle est à nouveau dissipée au lieu de pouvoir être récupérée.

La valeur de la chaleur latente dépend de la valeur de  $c$  à laquelle on franchit la ligne, du temps  $t_1$  à partir duquel le système transitionne et de la durée de vie  $T_{life}$  des investissements. De façon générale, la chaleur latente dans le cas d'une transition quasi-statique s'écrit :

$$L = cE(T_{life} - t_1) - \int_{t_1}^{T_{life}} c x_1(t) dt \tag{6.24}$$

Par exemple, pour le système décrit précédemment, pour un même chemin de transition et si la transition a lieu à  $t_1$ , les aires associées à  $L$  et  $Q$  sont représentées sur la Figure 6.18.

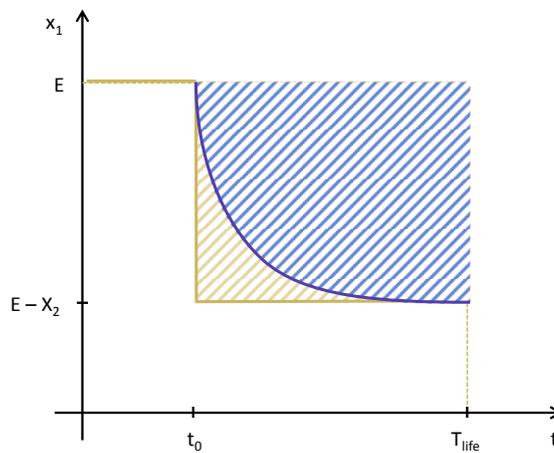


FIGURE 6.18 – Aires associées aux investissements sacrifiés

Ainsi, la chaleur latente associée à une transition quasi-statique sera inférieure à la chaleur dissipée par une transition brutale. Au niveau de la ligne de transition, on a :

$$L = cE(T_{life} - t_1) - \int_{t_1}^{T_{life}} c x_1(t) dt \leq Q = cE(T_{life} - t_1)$$

Avec le mécanisme dissipatif, notre description permet de mettre en évidence que le processus de transition impose de sacrifier du capital investi, c'est-à-dire  $L$ . À  $t_1 = T_{life}$ , on a  $L = 0$ , ce qui signifie que l'on a une transition de second ordre au sens d'Ehrenfest et non plus de premier ordre. L'avantage de cette transition est qu'elle ne nécessite pas de sacrifier des investissements, elle sera donc moins chère qu'une transition de premier ordre. Cependant, le défi de la transition énergétique bas-carbone est qu'elle doit être réalisée avant la fin de la durée de vie des technologies déjà construites. Par exemple, les centrales à charbon ont une durée de vie pouvant aller jusqu'à 40 ans alors que dans le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2018b), la neutralité carbone doit être atteinte au plus tard en 2050 pour limiter le réchauffement à  $1,5^\circ\text{C}$ . On souhaite donc réaliser une transition de premier ordre. L'enjeu de la transition est maintenant de minimiser la perte de  $L$  à travers un pilotage efficace.

#### *Coûts des chemins de transition*

On se limite au cas où les coûts  $c_1$  et  $c_2$  sont statiques et ne varient pas dans le temps, c'est-à-dire que sans aucune subvention ou taxe, les coûts restent égaux à leur valeur initiale (respectivement  $c_{1i}$  et  $c_{2i}$ )<sup>22</sup>. On souhaite calculer le coût total d'une trajectoire quasi-statique  $\mathcal{T}_{qs}$  et celui d'une trajectoire brutale  $\mathcal{T}_{br}$  pour un planificateur bienveillant.

Dans le cas de coûts statiques, pour investir dans la technologie décarbonée  $x_2$ , les subventions et les taxes appliquées modifient les coûts de telle façon que  $c_1 > c_2$ , c'est-à-dire que le système énergétique décarboné soit optimal. Notons les coordonnées du point final  $(c_{1f}, c_{2f})$ . Le coût du système énergétique décarboné est de  $c_{1f}(E - X_2) + c_{2f}X_2$ . Le planificateur paye le coût du système énergétique décarboné mais récupère la taxe qu'il applique sur le système (ou doit payer la subvention associée). En notant  $d_{1f}$  la taxe/subvention associée à  $x_1$  ( $d_{1f}$  est positif si c'est une taxe, et négatif si c'est une subvention) et  $d_{2f}$  la taxe associée à  $x_2$ , le coût pour le planificateur est de :

$$(c_{1f} - d_{1f})(E - X_2) + (c_{2f} - d_{2f})X_2$$

Comme  $c_{1k} - d_{1k} = c_{ki}$  avec  $(k = 1, 2)$ , on a :

$$(c_{1f} - d_{1f})(E - X_2) + (c_{2f} - d_{2f})X_2 = c_{1i}(E - X_2) + c_{2i}X_2$$

Pour le planificateur, le coût consenti devra donc être, en définitive, de  $c_{1i}(E - X_2) + c_{2i}X_2$ .

22. Dans le cas plus général où les coûts évoluent « naturellement » dynamiquement, on peut supposer de façon optimiste que cette évolution, sous l'effet de la R&D et de l'apprentissage, varie dans le sens de la transition bas-carbone, vers une phase décarbonée. L'évolution des coûts déterminera donc le chemin de transition et amoindra la difficulté de la transition. Dans ce cas, le chemin de transition sera déterminé par cette évolution de coûts mais pourra être amélioré en s'inspirant du traitement proposé ici pour le cas de coûts statiques.

Dans le cas de la trajectoire quasi-statique, le système arrive donc à  $t_1$  à la ligne de transition, finit de la traverser à  $t'_1$  et arrive au point final à un temps noté  $t_f$  (voir Figure 6.19). Puisque la perte des investissements liés à  $x_1$  est plus importante dans le cas brutal que quasi-statique, on a  $L \leq Q$  d'où :

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{qs} &= \int_0^{t_f} (c_{1i}x_1(t) + c_{2i}x_2(t))dt \\ &= Ec_{1i}t_1 + \int_{t_1}^{t'_1} (c_{1i}x_1(t) + c_{2i}x_2(t))dt \\ &\quad + (c_{1i}(E - X_2) + c_{2i}X_2) (t_f - t'_1) + L \\ &\leq \mathcal{T}_{br} = Ec_{1i}t_1 + (c_{1i}(E - X_2) + c_{2i}X_2) (t_f - t_1) + Q \end{aligned}$$

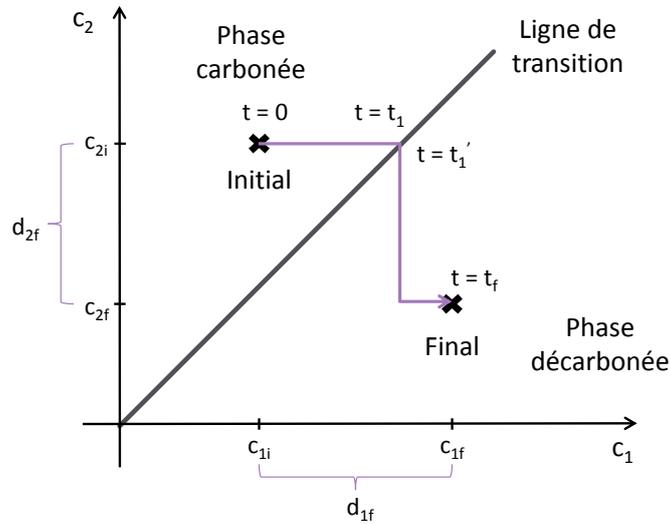


FIGURE 6.19 – Exemple de chemin de transition quasi-statique

Lorsque la transition est quasi-statique – c’est-à-dire qu’on applique des variations « infinitésimales » de taxes et de subventions sur les coûts des technologies –, le coût de la trajectoire de transition est donc plus faible que dans le cas d’une transition brutale.

*Cinétique à la ligne de transition*

Pour réaliser une transition quasi-statique, il faut, lorsqu’on se trouve sur la ligne de transition ( $c_1 = c_2$ ), piloter l’évolution de la technologie  $x_1$  et donc la perte des investissements liés à  $x_1$ , c’est-à-dire la chaleur latente.

Plusieurs types de pilotage sont possibles et nous choisissons le pilotage suivant<sup>23</sup> :

$$c \frac{dx_1}{dt} (T_{life} - t) = -k(x_1 - x_f)$$

23. On aurait pu envisager un autre type de pilotage où l’évolution de  $x_1$  est soumise à une variable de contrôle  $k$  proportionnelle à la distance entre  $x_1$  et la

avec :

- $x_f = E - X_2$
- $T_{life}$  : durée de vie de la technologie  $x_1$
- $k$  : contrôle à appliquer à  $x_1$

L'évolution de  $x_1$  est déterminée par l'équilibre entre deux termes : d'une part, une amende contrôlée par  $k$  sur l'écart entre  $x_1$  et la solution décarbonée  $x_f$  ; et d'autre part, le sacrifice de  $x_1$  à la valeur  $c$  sur la durée  $(T_{life} - t)$ . Autrement dit, le sacrifice du capital associé à  $dx_1$ , c'est-à-dire  $c \frac{dx_1}{dt} (T_{life} - t)$  s'équilibre avec la valeur de l'amende (ou la pénalisation)  $k(x_1 - x_f)$ , car il est plus rationnel de sacrifier le capital  $dx_1$  si la pénalisation est plus importante que le coût escompté du système.

À partir de cette équation cinétique, on obtient les éléments suivants :

- l'évolution de  $x_1$
- le moment  $t_{car}$  où on transite à 99 % :

$$x_1(t_{car}) = x_f + 1\%(E - x_f)$$

- la chaleur latente  $L$  :

$$L(c, k) = cE(T_{life} - t_1) - \int_{t_1}^{T_{life}} cx_1(t)dt$$

On notera que cette équation cinétique n'a que deux degrés de liberté : sur les trois paramètres  $t_{car}$ ,  $c$  et  $k$ , si deux sont fixés alors le troisième est déterminé.

Ces équations donnent l'évolution de  $x_1$  à la ligne de transition :

$$x_1(t) = (E - X_2) + X_2 \left( \frac{T - t}{T - t_1} \right)^{\frac{k}{c}}$$

On obtient trois types d'évolution de  $x_1$  suivant les valeurs de  $c$  et de  $k$  (voir [Figure 6.20](#)) :

- si  $k = c$  : linéaire
- si  $c < k$  : convexe
- si  $c > k$  : concave

Par la suite, nous nous limiterons aux cas  $c < k$  car nous cherchons les transitions qui se passent pour un temps  $t_{car} \ll T_{life}$

---

solution décarbonée  $x_f$  et au volume des émissions/activité de  $x_1$  (on multiplie en plus par  $x_1$ ) ce qui donne :

$$c \frac{dx_1}{dt} (T_{life} - t) = -k(x_1 - x_f)x_1$$

Cette cinétique donne le même type de courbes que celles obtenues par la suite mais conduit à des valeurs de  $k$  plus faibles.

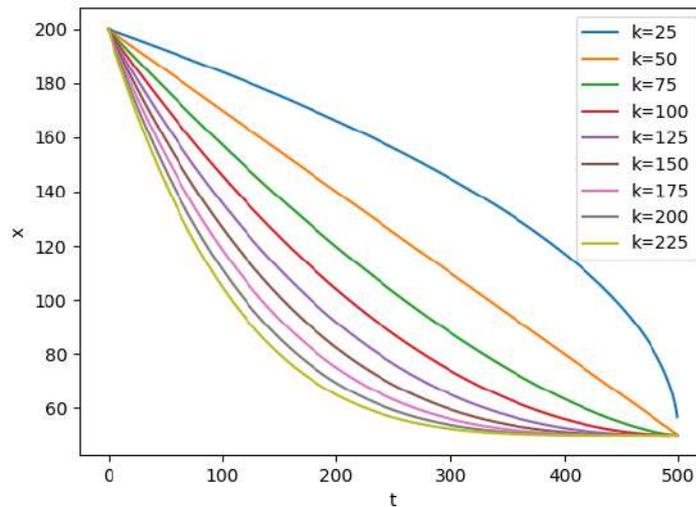


FIGURE 6.20 – Évolution de  $x_1$  suivant différentes valeurs de  $k$  pour  $c = 50$

### *Principe variationnel*

Pour faire une transition quasi-statique du système énergétique, il faut passer du point initial I à un point final F se trouvant dans la phase décarbonée en appliquant des taxes et/ou des subventions sur les coûts  $c_1$  et  $c_2$  qui permettront ainsi de faire varier les coûts initiaux (voir Figure 6.21). On note  $c_{1i}$  et  $c_{2i}$  les coûts initiaux, et  $c_1(t)$  et  $c_2(t)$  les coûts comprenant les taxes et subventions. On cherche donc à déterminer le coût  $c$  optimal où le système traversera la ligne de transition, le paramètre  $k$  optimal permettant de pénaliser l'actif  $x_1$  ainsi que le temps optimal  $t_1$  à passer dans la phase carbonée avant de réaliser la transition. On aura alors  $c_1(t_1) = c_2(t_1)$ . Il faut en outre définir au préalable la date à laquelle le système doit avoir fini de transitionner, c'est-à-dire  $t_f$ .

Pour trouver ce chemin optimal, deux options sont possibles :

1. minimiser le surcoût de la trajectoire ;
2. minimiser la valeur finale de  $x_1$  en définissant un budget carbone à respecter.

On introduit donc un problème d'optimisation qui permet de trouver un équilibre entre le temps  $t_1$  que le système met pour aller à la ligne de transition et le coût  $c$  qui est le point de franchissement de la ligne de transition. On considère qu'une fois que le système a fini de transitionner (quand il se trouve exactement de l'autre côté de la ligne), amener ce système à un autre point final serait coûteux ou ne rentre pas dans notre objectif de politique climatique qui est uniquement d'amener le système dans l'autre phase. Une fois la ligne franchie, on s'arrête donc à la ligne de transition et on ne cherche pas à aller plus loin.

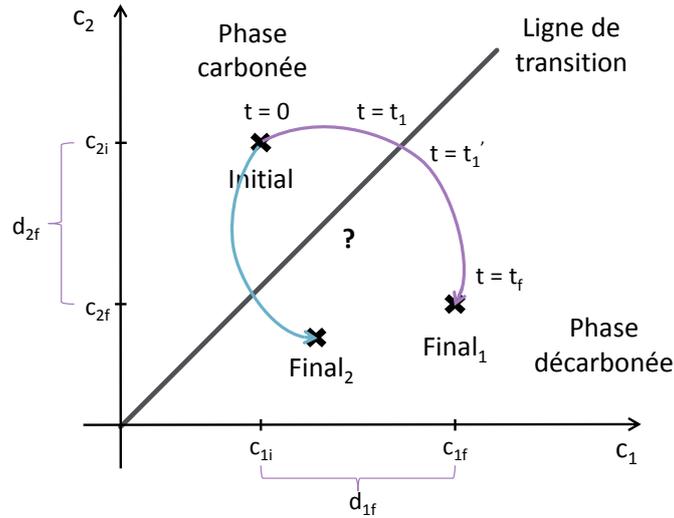


FIGURE 6.21 – Chemin de transition quasi-statique

*Déclinaison du principe variationnel*

On note  $t_f$  la date à laquelle on souhaite avoir transité avec  $t_f < T_{life}$ . On considère que la transition est réalisée lorsque le système a atteint à 99 % sa valeur finale, c'est-à-dire à  $t_{car}$  donc  $t'_1 = t_{car}$ . En outre, la trajectoire doit respecter un budget carbone maximal, dans le même esprit que pour atteindre l'objectif de 2°C, des budgets carbones sont calculés (QUÉRÉ et al., 2018). Les variables de décisions du problème d'optimisation sont  $c, k$  et  $t_1$ .

Le surcoût de la trajectoire SC correspond aux taxes gagnées ou aux subventions dépensées entre 0 et  $t_f$  ainsi qu'à la chaleur latente. Il est défini par :

$$\begin{aligned}
 SC = & \underbrace{\int_0^{t_1} (c_1(t) - c_{1i}) E dt}_{\text{taxes dans la phase carbonée}} + \underbrace{(c - c_{1i}) \int_{t_1}^{t'_1} x_1(t) dt + (c - c_{2i}) \int_{t_1}^{t'_1} x_2(t) dt}_{\text{taxes sur } x_1 \text{ et } x_2 \text{ à la ligne de transition}} \\
 & + \underbrace{\int_{t'_1}^{t_f} [(c_1(t) - c_{1i})(E - X_2) + (c_2(t) - c_{2i})X_2] dt}_{\text{taxes dans la phase décarbonée}} - \underbrace{L}_{\text{chaleur latente}} \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

On peut donc gagner de l'argent en taxant  $c_1$  qu'on dépensera en chaleur latente à la ligne de transition. Plus précisément, le gain des taxes appliquées à  $x_1$  entre  $t = 0$  et  $t_f$  plus celles de  $x_2$ , qui peuvent être négatives (ce sont alors des subventions) doit compenser la perte de chaleur latente  $L$ . L'idée de cet équilibre correspond à une redistribution de la fiscalité bas-carbone.

**Méthode « surcoût »** La première option pour déterminer ces valeurs est de résoudre le problème suivant :

$$\min | SC |$$

sous les contraintes :

- le budget carbone a une valeur maximale :  $\int_0^{t_f} x_1(t)dt \leq B_{max}$
- la transition doit être finie avant  $t_f$  :  $t_{car} \leq t_f \leq T_{life}$

**Méthode « budget »** Cependant, minimiser le surcoût n'est pas forcément un critère absolu pour un planificateur bienveillant (c'est-à-dire pour les politiques dans un cas concret). Nous proposons donc une approche qui consiste à atteindre la phase décarbonée à  $t_f$  tout en respectant un budget carbone maximal. Pour atteindre cet objectif, une valeur maximale pour le surcoût est également fixée. Notre problème d'optimisation devient :

$$\min x_1(t_f) \tag{6.26}$$

sous les contraintes :

- de budget carbone maximal :  $\int_0^{t_f} x_1(t)dt \leq B_{max}$
- de surcoût maximal de la trajectoire :  $SC \leq SC_{max}$
- de temps de la transition :  $t_{car} \leq t_f \leq T_{life}$

Ces problèmes d'optimisation nous permettent ainsi de définir un principe variationnel qui donne les valeurs optimales de  $c$ ,  $k$  et  $t_1$  pour réaliser la transition.

### 6.3.3 Élaboration de chemins de transition dans deux cas simplifiés

#### Cas de 2 technologies

Pour simplifier notre problème d'optimisation, on se place dans le cas où le planificateur applique les taxes et les subventions de façon linéaire à partir de  $t = 0$ , c'est-à-dire que pour  $t \leq t_1$ , on a :

$$c(t) = \frac{c(t_1) - c_i}{t_1}t + c_i$$

La cinétique à la ligne de transition est contrôlée par le paramètre  $k$ . Pour les applications numériques, on prend :

$t_f$	$T_{life}$	$E$	$X_2$	$c_{1i}$	$c_{2i}$
50	60	200	150	30	60

On note  $SC_2$  le surcoût de la trajectoire dans le cas de deux technologies avec :

$$SC_2 = \frac{c - c_{1i}}{2} E t_1 + (c - c_{1i}) \int_{t_1}^{t_f} x_1(t) dt + (c - c_{2i}) \int_{t_1}^{t_f} x_2(t) dt - L$$

avec :

$$L = cE(T_{life} - t_1) - c \int_{t_1}^{T_{life}} x_1(t) dt$$

**Méthode surcoût** Le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min | SC_2 |$$

sous les contraintes :

- de budget carbone :  $\int_0^{t_f} x_1(t) dt \leq B_{max}$
- de temps :  $t_{car} \leq t_f$

On propose une analyse de sensibilité suivant la valeur de  $B_{max}$  et la valeur maximale de  $k$  notée  $k_{max}$ . Les solutions obtenues sont présentées dans le [Tableau 6.9](#). Si la valeur de  $k_{max}$  est trop basse, le problème peut devenir infaisable et n'a pas de solution, ce qui signifie que sans mise en place de pénalité importante, la transition ne peut avoir lieu. Le surcoût de toutes ces solutions est nul.

Pour respecter un budget carbone, plusieurs chemins de transition sont donc possibles. Pour un budget élevé, donc peu contraignant (ici 9 000), plusieurs valeurs de coût  $c$ , associées à différentes valeurs de  $k$  et  $t_1$  sont possibles. Toutefois, si la valeur de  $k$  est trop basse (si  $k$  est inférieur à 320), il n'y a pas de solution ce qui signifie que le pilotage de la transition avec la cinétique adoptée ne peut pas se dérouler sur une plage temporelle trop importante. Il faut donc mettre en place un  $k$  suffisamment grand pour pouvoir transitionner qui sera imposé par une politique publique assumée. Pour un budget carbone plus contraignant (ici 5 000), les chemins accessibles sont encore plus restreints : les valeurs de  $t_1$  sont plus limitées pour respecter le budget carbone et inférieures à celles du cas précédent. Avec ces résultats, on constate que la question du surcoût associé à la trajectoire n'est pas un facteur limitant (puisque'il est toujours nul). Les éléments qui conditionnent la résolution du problème sont le budget carbone adopté et la vitesse de transition maximale choisie. Si la vitesse de transition n'est pas assez rapide ( $k_{max}$  trop petit), et/ou si le budget carbone est trop contraignant ( $B_{max}$  trop petit) à cause de l'urgence climatique par exemple, il n'y a pas de chemin de transition possible.

TABLE 6.9 – Solutions avec la méthode du surcoût, cas à 2 technologies

Paramètres		Solution			Émissions	Surcoût
$B_{max}$	$k_{max}$	$c$	$k$	$t_1$	de la sol.	
	500	119	326	5	5543	0
	500	72	364	35	8383	0
9000	500	69	373	36	8501	0
	$\leq 320$				pas de solution	
	500	142	499	4	4999	0
	500	142	452	3	4779	0
5000	500	144	499	5	4905	0
	$\leq 360$				pas de solution	

**Méthode budget** Le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min x_1(t_f)$$

sous les contraintes :

- de budget carbone :  $\int_0^{t_f} x_1(t) dt \leq B_{max}$
- de surcoût maximal :  $|SC_2| \leq SC_{max}$
- de temps :  $t_{car} \leq t_f$

De même qu'avec la méthode du surcoût, pour un jeu de contraintes, plusieurs solutions sont obtenues et donc différents chemins de transition. L'analyse de sensibilité suivant différentes valeurs de  $k_{max}$  est présentée dans la [Tableau 6.11](#). Les émissions associées à ces différents chemins de transitions varient suivant les valeurs de  $t_1$  et de  $k$  trouvées. Avec cette méthode, la valeur de  $k$  obtenue se trouve au maximum autorisé pour que la valeur de  $x_1(t_f)$  soit au minimum possible.

TABLE 6.11 – Solutions avec la méthode budget, cas à 2 technologies

Paramètres			Solution			Émissions	Surcoût
$SC_{max}$	$B_{max}$	$k_{max}$	$c$	$k$	$t_1$	de la sol.	
			97	500	14	5851	99999
		500	41	500	38	8500	99999
100000	9000		60	500	30	7533	99999
		$\leq 210$				Pas de solution	

### Cas de 3 technologies

On complexifie le cas précédent en ajoutant une technologie à notre système. On se place toujours dans le cas où le planificateur applique les taxes et les subventions de façon linéaire à partir de  $t = 0$ .

**Problème d'optimisation** On ajoute une technologie (3), décarbonée également, dont l'activité est notée  $x_3$ , et le coût associé  $c_3$ . Le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3$$

sous les contraintes :

- $x_1 + x_2 + x_3 \geq E$ ,  $E$  étant la demande en énergie
- $x_2 \leq X_2$  avec  $X_2 \leq E$ ,
- $x_3 \leq X_3$  avec  $X_3 \leq E$  et  $X_2 + X_3 \geq E$

Les solutions sont donc au nombre de cinq :

1. solution carbonée :  $(x_1 = E, x_2 = 0, x_3 = 0)$
2. solution intermédiaire :  $(x_1 = E - X_2, x_2 = X_2, x_3 = 0)$
3. solution décarbonée :  $(x_1 = 0, x_2 = X_2, x_3 = E - X_2)$
4. solution décarbonée :  $(x_1 = 0, x_2 = E - X_3, x_3 = X_3)$
5. solution intermédiaire :  $(x_1 = E - X_3, x_2 = 0, x_3 = X_3)$

Les solutions 3 et 4 sont équivalentes en terme d'émissions car on suppose que les deux technologies associées à  $x_2$  et  $x_3$  sont totalement décarbonées.

**Diagramme de phase** Le diagramme de phase associé au problème d'optimisation permet de visualiser les deux familles de chemins de transitions possibles pour passer d'une phase carbonée à une phase décarbonée (Figure 6.22). En particulier, on observe l'apparition d'un point « quintuple » où peuvent coexister l'ensemble des phases (par analogie avec le point triple de l'eau sur la Figure 6.3). L'existence de ce point permet d'introduire la notion de compétition entre trajectoires.

Le coût du système énergétique dans une phase est le même pour le planificateur bienveillant, quel que soit le point associé au diagramme de phase puisqu'il doit toujours payer les coûts initiaux dans le cas de coûts statiques. Le système énergétique associé à la phase 3 est moins cher que celui associé à la phase 4 si  $c_{2i} \leq c_{3i}$  (ligne en pointillée). Nous nous concentrerons sur le chemin qui mènera au système le moins cher.

On se place dans le cas où  $c_{2i} \leq c_{3i}$ . Le chemin privilégié sera donc celui qui passe par la phase 2 pour aboutir à la phase 3. La cinétique à la ligne de transition entre la phase 1 et 2 est contrôlée par le paramètre  $k_{12}$  et celle entre la phase 2 et 3 par  $k_{23}$ . Il y a donc deux lignes de transitions à traverser. On note  $a_1$ , la valeur à laquelle la première

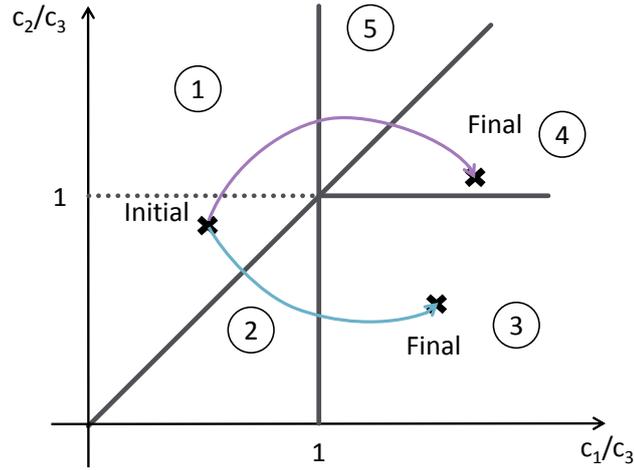


FIGURE 6.22 – Diagramme de phase, cas à 3 technologies

ligne de transition est franchie. On a alors  $a_1 = c_1 = c_2$ . La seconde ligne de transition entre la phase 2 et 3 nécessite deux paramètres,  $a_2$  pour la valeur de  $c_2$  et  $b$  qui permet de déterminer  $c_1$  et  $c_3$  puisque  $c_1 = c_3$ .

Pour les applications numériques, on prend :

$t_f$	$T_{life}$	$E$	$X_2$	$X_3$	$c_{1i}$	$c_{2i}$	$c_{3i}$
50	60	200	150	170	30	60	80

Les évolutions des coûts sont toujours linéaires. On note le surcoût de la trajectoire  $SC_3$  avec :

$$\begin{aligned}
 SC_3 = & \frac{a_1 - c_{1i}}{2} E t_1 + (a_1 - c_{1i}) \int_{t_1}^{t_{car1}} x_1(t) dt + (E - X_2) \int_{t_{car1}}^{t_2} (c_1(t) - c_{1i}) dt \\
 & + (b - c_{1i}) \int_{t_2}^{t_f} x_1(t) dt + (a_1 - c_{2i}) \int_{t_1}^{t_{car1}} x_2(t) dt + \frac{b - c_{2i}}{2} X_2 (t_f - t_{car1}) \\
 & + X_2 \int_{t_{car1}}^{t_2} (c_2(t) - c_{2i}) dt + X_2 (a_2 - c_{2i}) (t_f - t_2) + (b - c_{3i}) \int_{t_2}^{t_f} x_3(t) dt \\
 & - L_{12} - L_{23}
 \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned}
 L_{12} = & a_1 E (T_{life} - t_1) - a_1 \int_{t_1}^{T_{life}} x_1(t) dt \\
 L_{23} = & b (E - X_2) (T_{life} - t_2) - b \int_{t_2}^{T_{life}} x_1(t) dt
 \end{aligned}$$

**Méthode surcoût** Notre problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min |SC_3|$$

sous les contraintes :

- de budget carbone :  $\int_0^{t_f} x_1(t)dt \leq B_{max}$
- de temps final :  $t_{car2} \leq t_f$
- de temps intermédiaire :  $t_{car1} \leq t_2$
- de coefficient :  $a_2 \leq b$

Les analyses de sensibilité sur la valeur de  $B_{max}$  conduisent à des solutions différentes. En outre, on fait varier la valeur maximale de  $k_{12}$  et  $k_{23}$ . Les solutions obtenues sont présentées dans le [Tableau 6.14](#). Si la valeur maximale des  $k$  est trop basse – dans les exemples suivants, si elle est inférieure à 170 –, le modèle est infaisable et n'a pas de solution. Ici aussi, le surcoût associé aux solutions est nul.

Dans ce cas à trois technologies, les chemins explorés sont beaucoup plus complexes puisqu'ils dépendent de beaucoup plus de paramètres que dans le cas de deux technologies. Les budgets carbones appliqués en contrainte semblent par ailleurs peu contraignants car aucune solution n'arrive à saturer cette contrainte. Il semble toutefois que la pénalité  $k_{12}$  soit toujours très supérieure à  $k_{23}$  ainsi que les rapports  $\frac{k_{12}}{a_1}$  et  $\frac{k_{23}}{a_2}$ , ce qui implique que la première ligne de transition doit être franchie plus rapidement que la seconde.

TABLE 6.14 – Solutions avec la méthode surcoût, cas à 3 technologies

$B_{max}$	$k_{max}$	$a_1$	$k_{12}$	$t_1$	$b$	$a_2$	$k_{23}$	$t_2$	Émissions	Surcoût
9000	500	27	448	7	78	68	343	20	2942	0
		5	477	40	26	25	296	44	8448	0
		28	470	4	75	73	360	20	2549	0
	170	pas de solution								
5000	500	28	451	5	78	71	347	21	2711	0
		8	386	10	65	65	289	28	3478	0
	23	477	6	79	69	379	23	2799	0	
170	pas de solution									

**Méthode budget** Le problème d'optimisation à résoudre est le suivant :

$$\min x_1(t_f)$$

sous les contraintes :

- de budget carbone :  $\int_0^{t_f} x_1(t)dt \leq B_{max}$

- de surcoût maximal :  $|SC_3| \leq SC_{max}$
- de temps final :  $t_{car2} \leq t_f$
- de temps intermédiaire :  $t_{car1} \leq t_2$
- de coefficient :  $a_2 \leq b$

De même qu'avec la méthode du surcoût, pour un jeu de contraintes, plusieurs solutions sont obtenues. L'analyse de sensibilité suivant différentes bornes supérieures de  $k_{12}$  et  $k_{23}$ , notées  $k_{max}$ , est présentée dans le [Tableau 6.15](#). Avec ces solutions, les chemins de transition passent tous par le point quintuple pour le franchissement de la deuxième ligne de transition puisque  $a_2 = b$ . Les chemins restent cependant très différents en terme d'émissions associées ou de surcoût.

TABLE 6.15 – Solutions avec la méthode budget, cas à 3 technologies

$SC_{max}$	$B_{max}$	$k_{max}$	$a_1$	$k_{12}$	$t_1$	$b$	$a_2$	$k_{23}$	$t_2$	Émissions	Surcoût
			1	159	40	27	27	220	40	8216	9999
10000	9000	500	35	306	1	52	52	306	25	2582	3737
			45	400	14	47	47	500	33	4641	9999
		150	pas de solution								

## 6.4 CONCLUSION

La richesse du domaine de la physique des transitions de phase nous a permis de développer une analogie entre le concept de transition de phase et celui de transition énergétique. La première analogie s'est appuyée sur la classification d'Ehrenfest et a conduit à la définition d'un profil de taxes et de subventions permettant de passer d'une trajectoire à une autre. Il faut ainsi définir un critère permettant de sélectionner la trajectoire vers laquelle on souhaite transitionner, respectant un budget global d'émission, et minimisant éventuellement le coût. L'avantage de cette approche réside dans la détermination d'un profil dynamique de taxes de manière intertemporelle. Cependant, elle implique de mettre en place un pilotage défini a priori, puisqu'il faut dès l'instant initial appliquer l'ensemble du profil de taxes sur les technologies. Par ailleurs, comme elle ne prend pas en compte la réalité spatiale d'une phase, elle ne peut pas reproduire des phénomènes d'hystérésis ou le concept de chaleur latente.

C'est cette dernière notion que nous avons pu introduire dans une analogie enrichie, basée sur l'approche de Landau. La chaleur latente permet de mettre en évidence l'importance des coûts échoués lors du processus de transition. Pour définir un chemin de transition, un compromis doit être trouvé entre le temps passé avant de franchir une ligne de transition, le coût auquel on franchit cette ligne et la vitesse à laquelle on la traverse contrôlée par le paramètre  $k$ . Cette analogie

nous montre également que le processus de transition nécessite dès le départ de savoir dans quelle phase le système se trouve pour pouvoir transitionner vers une autre phase, elle aussi identifiée au préalable. Les trajectoires doivent alors être le plus quasi-statique possible afin de minimiser le coût total. Cependant, la complexification du modèle constitue un défi important. Un nombre croissant de technologies entraîne l'augmentation du nombre de paramètres associés. Avec un modèle à trois technologies, la complexité associée au nombre de lignes de transition est déjà beaucoup plus importante que dans le modèle à deux technologies. Cette complexité tend à montrer que le pilotage de la transition sera difficile à mettre en œuvre. Ainsi, la détermination des phases associées à un système très complexe comme celui représenté par le modèle TIMES-France semble difficile à réaliser. On peut néanmoins considérer que les traces de processus de transition peuvent être identifiées lorsque des activités d'une technologie diminuent alors que les capacités sont constantes. Si une telle trace peut être visible pour des technologies à durée de vie très longue comme des centrales nucléaires de 60 ans, elle sera difficilement identifiable dans le secteur du transport par exemple où les voitures ont une durée de vie d'une quinzaine d'années.

Les éléments que l'on peut retirer de ces analogies nous donnent un certain nombre d'indications sur les actions à mettre en place pour réaliser une transition énergétique bas-carbone et permettent également d'analyser pourquoi nous sommes encore aujourd'hui en situation de blocage malgré les alertes répétées sur l'urgence de la situation depuis plusieurs dizaines d'années. Avec l'analogie s'inspirant d'Ehrenfest, l'outil de pilotage proposé est un profil de taxes et subventions mais sa mise en œuvre extrêmement complexe fait écho aux difficultés auxquelles le gouvernement doit faire face dans l'estimation des subventions attribuées aux différentes énergies renouvelables ainsi que du niveau de taxe à appliquer. Avec l'analogie s'inspirant de Landau, le pilotage se fait à travers des taxes et des subventions mais également une pénalité qui doit être mise en place à la ligne de transition. Toute la difficulté réside alors dans la gestion des investissements sacrifiés, ce qui là encore renvoie aux difficultés actuelles d'abandonner des actifs carbonés dont la valeur financière est encore trop importante.

PROPOS CONCLUSIF

## CONCLUSION

---

*La fin du monde est pour demain  
Arôme fou d'un matin splendide*

— Jacques Perry-Salkow

Après le développement durable, la *transition énergétique* semble être le nouvel horizon des politiques climatiques. Tout comme l'invocation du développement durable n'a pas permis d'endiguer l'effondrement de la biodiversité ou la poursuite du réchauffement climatique, une utilisation incantatoire du concept de transition énergétique risque de conduire à une trajectoire incompatible avec la décarbonation de nos sociétés. Pour THEYS (2015b), « ni l'injonction au "développement durable" ni la notion de transition ne suffisent à affronter efficacement » les défis posés par le changement climatique. Dans cette optique, nous avons constaté que les nombreux documents programmatiques présentés en tant qu'action concrète ne garantissent pas pour autant un déclenchement de la transition énergétique. Cependant, nous pensons qu'il est possible de sortir de l'ambiguïté du concept en se fondant sur le sens donné par la physique des transitions de phase.

Au lieu de renvoyer au concept de transformation graduelle qui ne permet pas de s'assurer que le système visé soit atteint, nous nous appuyons sur l'idée que la transition renvoie à un changement de l'état d'un système où il est possible de connaître « les états successifs et où l'on peut identifier, et même anticiper, le passage d'une configuration à l'autre » (MARESCA et DUJIN, 2014). Il serait présomptueux d'appliquer cette assertion pour la société où le saut d'un état social à un autre n'est pas possible. Dans ce cas, il est plus probable que ce soit une transition graduelle qui se déroule. Pour le système énergétique en revanche, les futurs possibles ne sont pas infinis, et notre analogie apporte des éléments de compréhension au processus de transition.

**Contributions** Dans le [chapitre 1](#), nous sommes revenus sur l'émergence de la notion de transition énergétique et avons souligné son ambiguïté. Elle est en effet mobilisée pour différents projets de transformation du système énergétique incompatibles entre eux. D'autre part, le recours à la notion de transition énergétique masque souvent une inaction dans les faits, aussi bien au niveau mondial comme l'illustrent les discours performatifs autour de la mise en œuvre de l'accord de Paris qu'au niveau national dans le cas de la France comme nous l'avons vu dans le [chapitre 3](#).

Dans le [chapitre 2](#), nous avons retracé les conditions d'émergence des transitions énergétiques dans le passé. Après être revenus briè-

vement sur les principales transitions énergétiques mondiales, nous avons étudié les moteurs de différentes transitions énergétiques comme la révolution industrielle. Celle-ci a bénéficié d'un ensemble de facteurs favorables qui ont conduit à son émergence spontanée. En particulier, l'intérêt économique associé au charbon était suffisamment important pour susciter d'importantes innovations et des investissements favorables à son déploiement. L'importance de la nouveauté des services a été souligné par les historiens mais elle doit être combinée à des prix bas pour que le service puisse se diffuser. De notre observation de différentes transitions énergétiques, nous avons donc analysé qu'elles avaient souvent été pilotées en boucle ouverte ou n'avaient tout simplement pas bénéficié de pilotage. Les questions environnementales n'ont de plus pas suffi à initier une transition suffisamment tôt pour éviter des dommages importants. Nous en avons donc conclu que le pilotage de la transition énergétique devait être appréhendé différemment du passé, et en particulier que pour mettre en œuvre une transition énergétique bas-carbone, un pilotage en boucle ouverte doit être mis en place.

Dans le [chapitre 3](#), nous avons analysé le cas de la France en retraçant l'évolution des politiques énergétiques mises en place jusqu'à aujourd'hui et nous avons montré que ce sont les intérêts économiques qui ont principalement motivé la principale transition énergétique que la France a connu, celle du secteur électrique avec le déploiement du nucléaire<sup>24</sup>. Concernant la transition énergétique bas-carbone, la France fait face à de nombreuses difficultés dans sa mise en œuvre et ne semble ainsi pas vraiment l'avoir initiée<sup>25</sup> malgré l'adoption de nombreuses mesures et objectifs pour faire advenir une « transition énergétique pour la croissance verte ». Les effets des politiques publiques sont en effet encore limités et l'évolution du système énergétique n'est pas en accord avec les objectifs ambitieux affichés. Le pilotage de la transition énergétique est toujours envisagé de la même façon que par le passé, les intérêts économiques sont toujours prédominants sur les autres objectifs climatiques et empêchent la constitution d'une politique cohérente à travers tous les ministères.

Dans le [chapitre 4](#), nous avons réfléchi au futur de la transition énergétique en France. Pour la réaliser, l'outil habituellement proposé par beaucoup d'économistes « orthodoxes » est la taxe carbone. Grâce à un outil de prospective, le modèle d'optimisation TIMES-France, nous avons évalué le niveau de taxe associé à un objectif de neutralité carbone en 2050. La taxe atteint un niveau très élevé en 2050, au-dessus des 1 000 €/tCO<sub>2</sub> et constitue un outil difficile à appliquer

24. Dans le secteur de l'industrie ou des bâtiments (résidentiel et tertiaire), on pourrait identifier une transition énergétique vers le gaz mais ce n'est pas une transition énergétique bas-carbone.

25. Il est difficile d'avoir un jugement définitif sur le déroulement en cours ou non d'une transition énergétique car ce n'est que rétrospectivement qu'un avis définitif peut être émis.

si l'on veut à la fois garantir une acceptabilité politique et sociale. Nous avons ensuite étudié des trajectoires du système énergétique français à l'horizon 2050 en soulignant tout d'abord les difficultés de l'atteinte d'un objectif de neutralité carbone. Le modèle arrive ainsi à satisfaire toutes les contraintes imposées uniquement grâce à des hypothèses optimistes concernant la disponibilité du CCS, une évolution modérée des demandes de service énergétique ou encore la construction de nouvelles centrales nucléaires. Nous avons ensuite analysé les différences entre une trajectoire de type LTECV et neutralité. Tout d'abord, l'objectif de réduction de la consommation d'énergie de 50% en 2050 par rapport à 2012 ne semble pas pouvoir être respecté étant donné les évolutions des demandes de service énergétique. Ensuite, dans chacun des scénarios étudiés, le système énergétique évolue très différemment, dont notamment le système électrique ainsi que la structure de l'utilisation de la biomasse. Enfin, nous sommes revenus sur le cas de la Suède, pays qui présente des similarités avec la France comme un mix électrique décarboné. Ce pays a mis en place une politique énergétique depuis les années 1970 plus diversifiée qui lui permet aujourd'hui de se trouver dans une situation plus favorable pour atteindre la neutralité carbone que la France.

Ces deux chapitres nous ont donc permis de mettre en évidence que les tentatives actuelles de contrôle de la transition énergétique ne sont pas performantes. Cela nous a donc conduit à nous interroger sur de nouvelles façons de piloter la transition énergétique, et comme nous l'avons conclu de l'analyse du chapitre 2, sur la mise en place d'un pilotage en boucle fermée.

Dans le chapitre 5, nous avons étudié la proposition de TM du courant des *Sustainability Transitions* dont les cas d'applications ne nous ont convaincus ni de leur pertinence ni de l'effectivité des solutions proposées. En particulier, leur apport ne semble pas fondamentalement différent des approches de modernisation écologique, cherchant à préserver une croissance économique grâce à la promotion d'innovations technologiques.

Pour mettre en place un pilotage en boucle fermée, il faut donc explorer de nouvelles approches de la transition énergétique comme nous l'avons fait dans le chapitre 6. En nous appuyant sur les transitions de phase en physique, nous avons élaboré un nouveau cadre d'appréhension de la transition énergétique. Une transition de phase est provoquée par la variation continue d'une variable d'état qui entraîne une discontinuité que nous avons cherchée à mettre en évidence dans le cas du système énergétique. Après identification des états du système énergétique, nous avons cherché à transitionner entre ceux-ci. Dans une première analogie, cela nous a conduit à définir un ensemble de taxes et subventions évoluant dans le temps et permettant de transitionner entre différentes trajectoires temporelles. Nous avons ensuite prolongé cette analogie pour proposer un nouveau modèle

plus universel. Avec cette approche, nous avons élaboré une nouvelle méthode pour définir des chemins de transition dans un diagramme de phase basée sur le pilotage du sacrifice nécessaire des investissements carbonés grâce à une pénalité. Les deux analogies nous ont permis de souligner les difficultés du pilotage de la transition énergétique bas-carbone, au travers d'une part de la complexe mise en œuvre d'un profil de taxes et subventions décidées a priori et d'autre part de la difficulté d'accepter puis de gérer la perte d'investissements carbonés. Cette complexité est renforcée dans les deux cas par le grand nombre de technologies qui composent un système énergétique.

**Perspectives** Ce travail ouvre de larges perspectives et plusieurs pistes peuvent être envisagées. Tout d'abord, concernant l'analyse des transitions énergétiques passées, l'étude de transformations de systèmes socio-techniques différents du système énergétique (par exemple, système de gestion des déchets ou des égouts) permettrait d'apporter des éléments de compréhension au processus de transition comme l'a suggéré PEARSON (2018). Certaines études ont déjà été menées par le courant des *Transition Studies* et ont montré que des considérations environnementales ou hygiéniques étaient à l'origine de changements importants (par exemple dans les systèmes d'égouts, voir GEELS, 2006). Leur spécificité par rapport au système énergétique doit cependant être soulignée et en particulier, le poids des intérêts économiques pourrait être bien moins important que dans le cas du système énergétique, ce qui faciliterait un changement plus rapide. Par ailleurs, l'évolution du rôle joué par les consommateurs et citoyens et l'importance ou non de l'innovation permettraient de montrer comment un changement peut s'opérer sans forcément dépendre d'incitations économiques.

Concernant l'analyse de la France, nous avons vu que les évolutions institutionnelles pourraient apporter un nouveau cadre du pilotage de la transition énergétique bas-carbone. Une évaluation de l'impact et de l'organisation du HCC sera ainsi nécessaire pour confirmer ou infirmer l'efficacité de son action. La question de la gouvernance énergétique demeure complexe, comme l'illustrent les changements amorcés dans plusieurs pays qui se dotent d'une structure dédiée (Suède, Allemagne, etc.). La prolongation de la réflexion sur la comparaison entre différents pays pourrait aboutir à des conseils spécifiques pour le cas français. De plus, l'articulation des différentes échelles de gouvernance n'a pas été explorée, c'est-à-dire la réconciliation entre les objectifs fixés au niveau national et leur mise en place dans les différentes régions. Enfin, l'analyse du suivi de la transition énergétique et son évaluation constituent des enjeux importants pour mettre en place une gouvernance efficace. Comme nous l'avons vu, le choix d'indicateurs garantissant une lisibilité s'avère compliqué. La question de leur appropriation par les différents acteurs et parties prenantes du système

énergétique pourrait être étudiée. En lien avec ces problématiques du suivi de la transition se pose la question du choix de la trajectoire du système énergétique. Une réflexion sur la meilleure manière d'informer les citoyens sur les futurs possibles du système énergétique constitue une piste de recherche intéressante. Avec le développement de l'*open access*, de nombreux modèles sont devenus accessibles mais l'appropriation de leur fonctionnement et de leurs résultats nécessitent souvent l'intermédiaire d'un expert. Des tentatives intéressantes ont été menées au Royaume-Uni ([DECC calculator](#)) ou en Suisse (XEXAKIS et TRUTNEVYTE, 2019) et pourraient être transposées pour alimenter les concertations citoyennes sur les enjeux énergétiques.

Par ailleurs, l'analyse de l'évolution du système énergétique français avec le modèle TIMES-France pourrait être prolongée grâce à un raffinement du modèle. Parmi les améliorations possibles, nous pouvons citer : la désagrégation plus fine des demandes avec éventuellement un pas temporel plus fin ; l'ajout de nouvelles technologies comme des processus de récupération de chaleur fatale dans l'industrie ou une meilleure représentation du CCS, en particulier dans les secteurs hors IGCE ; l'auto-consommation dans les secteurs résidentiel et tertiaire ; ou encore une meilleure représentation des infrastructures routières et ferroviaires liées au développement de la mobilité électrique ainsi que des infrastructures du réseau électrique.

Enfin, l'analogie entre transition énergétique et transition de phase pourra être approfondie. La méthode développée via l'analogie inspirée d'Ehrenfest pourrait être transposée à des petits modèles TIMES spécifiques à un secteur comme celui du transport. Concernant l'analogie inspirée de Landau, nous avons traité uniquement le cas de coûts statiques. Dans le cas de coûts dynamiques qui n'évolueraient pas vers une phase décarbonée, une réflexion sur le chemin de transition associé pourrait être menée. Par ailleurs, nous pourrions également envisager l'élaboration d'autres types de chemins de transition reposant sur un choix différent de celui que nous avons retenu, c'est-à-dire une évolution linéaire des taxes appliquées sur les coûts et qui conduirait à adopter une autre trajectoire. Par ailleurs, le pilotage à la ligne de transition pourrait être modélisé via une hypothèse d'évolution linéaire.

Le domaine des transitions de phase en physique reste très riche et d'autres éléments comme le rôle de la dimension spatiale et des échelles caractérisant les régimes de fluctuations pourraient enrichir notre compréhension des processus de transition et éclairer un pilotage moins pénalisant, validant ainsi l'intuition que la décomposition du système énergétique en plusieurs sous-systèmes cohérents entre eux facilite le processus de transition.

## ANNEXES

## PRÉSENTATION DES MODÈLES TIMES

---

### A.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

Les modèles TIMES<sup>1</sup> ou plus exactement les générateurs de modèles TIMES constituent une famille de modèles bottom-up qui permettent de réaliser des exercices de prospective long-terme du système énergétique. Ils sont développés dans le cadre du programme ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) depuis les années 1980 qui regroupe une large communauté dans le monde, environ 300 institutions réparties dans plus de 80 pays. Ces modèles du système énergétique se déclinent à différentes échelles, mondiale (SELOSSE et RICCI, 2014), nationale (ASSOUMOU et MAÏZI, 2011) ou locale (SELOSSE, GARABEDIAN et al., 2018), et comprennent un ou plusieurs secteurs suivant les données renseignées par l'utilisateur. KRAKOWSKI et al. (2016) représentent ainsi de manière détaillée le secteur de la production d'électricité, CAYLA et MAÏZI (2015) se concentrent sur le secteur résidentiel tandis que HUGUES, ASSOUMOU et MAÏZI (2016) décrivent le secteur d'approvisionnement en biomasse pour les biocarburants.

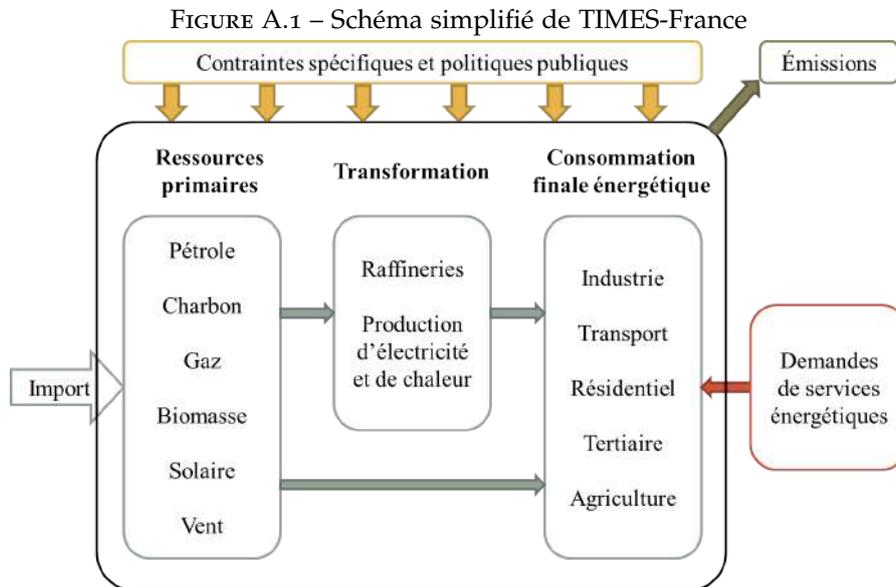
### A.2 UN MODÈLE INTÉGRÉ DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Les modèles TIMES proposent une représentation détaillée et désagrégée de l'offre technologique : les liens entre l'ensemble des technologies via les différents vecteurs énergétiques sont explicitement représentés et forment le système énergétique de référence ou RES (*Reference Energy System*) comme on peut le voir dans la [Figure A.1](#) représentant le modèle TIMES-France. Les technologies sont différenciées suivant les secteurs qui vont de l'amont (ressources d'énergies primaires) à l'aval (secteurs consommant l'énergie finale) en passant par les technologies de transformation d'énergie. Pour chacune des technologies, les caractéristiques techniques et les coûts sont précisés comme le rendement, la durée de vie, le coût d'investissement et de fonctionnement ou encore le facteur de disponibilité. Chaque technologie des secteurs consommant l'énergie finale permet par ailleurs de satisfaire une demande de service énergétique. TIMES est donc un modèle technologique qui comprend une représentation riche et

---

1. TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) est en fait issu de deux anciens paradigmes de modèle Markal et EFOM. Voir LOULOU et al. (2016) pour plus de détails.

détaillée des technologies actuelles et futures pour chaque secteur du système énergétique.



### A.3 UN MODÈLE D'OPTIMISATION LINÉAIRE PILOTÉ PAR LA DEMANDE

Les modèles TIMES opèrent une optimisation intertemporelle sur un horizon de quelques décennies du coût total actualisé associé au système énergétique, tout en tenant compte de différentes contraintes dont la principale est la satisfaction des demandes de service énergétique.

Le résultat de cette minimisation donne le bouquet optimal de technologies qui seront déployées sur l'horizon considéré ainsi que leurs niveaux d'activité. La représentation du système énergétique de référence associé au modèle permet de prendre en compte les substitutions possibles entre les différents vecteurs énergétiques pour les différents secteurs, d'estimer l'impact de l'évolution des coûts des énergies et des technologies mais aussi d'évaluer les conséquences sur le système énergétique d'une contrainte de baisse des émissions CO<sub>2</sub>.

Le problème d'optimisation linéaire à résoudre est le suivant :

$$\min \sum_{y \in \text{years}} (1 + d_y)^{REFYEAR-y} \times ANNCOST(y)$$

avec :

- $ANNCOST(y)$  : le coût annuel du système qui comprend entre autres les coûts d'investissement et les coûts variables des technologies,

- $d_y$  : le taux d'actualisation,
- *REFYEAR* : l'année de référence pour l'actualisation
- *years* : toutes les années entre l'année de référence et la fin de l'horizon du modèle,

sous un ensemble de contraintes :

- les demandes de service énergétique doivent être satisfaites,
- les contraintes techniques :
  - limites de disponibilité des technologies : l'activité des technologies est limitée par des facteurs de disponibilité ;
  - efficacité des technologies : elle permet de relier la consommation des vecteurs énergétiques d'entrée aux commodités de sortie de la technologie ;
  - équilibre des vecteurs énergétiques : le niveau de production d'un vecteur énergétique doit être supérieur à son niveau de consommation ;
  - accumulation des capacités : la capacité installée à une période donnée doit correspondre à la capacité résiduelle de la période précédente augmentée des nouveaux investissements ;
  - contrainte de *peak* dans le secteur de l'électricité : pour une certaine période (habituellement le *peak* durant l'hiver pour un pays comme la France), la capacité totale de production des technologies produisant de l'électricité doit être supérieure d'un certain pourcentage à la demande moyenne de cette période. Elle fait office de marge de sécurité vis-à-vis d'évènements extrêmes (hiver froid par exemple) qui ne sont pas explicitement représentés dans le modèle.
- les contraintes en ressources : limites sur les gisements d'énergies primaires, limites sur les rythmes de déploiement des technologies, limites sur les importations des énergies fossiles, limites sur les exportations, etc.,
- les contraintes environnementales ou politiques : limites d'émissions, taxes dans certains secteurs ou subventions etc.

La demande de service énergétique est renseignée de manière exogène ainsi que l'évolution des prix des énergies (comme le pétrole ou le gaz). L'optimisation est réalisée sur toute la période temporelle considérée en supposant donc une connaissance parfaite du futur : tous les développements techniques, économiques et politiques sont supposés connus. L'optimisation est donc réalisée du point de vue d'un planificateur bienveillant et omniscient<sup>2</sup>.

La demande de service énergétique peut également être rendue élastique par rapport à un scénario de référence : le modèle choisit

---

2. Une variante de l'optimisation réalisée en horizon myope est toutefois possible.

alors entre le recours à une technologie permettant de satisfaire la demande, et la réduction de la demande de service énergétique (dans une certaine mesure). Cette réduction de la demande est associée à un coût. En supposant que les marchés sont compétitifs, la résolution du problème d'optimisation permet de calculer les prix des services énergétiques, que les consommateurs sont prêt à payer, qui égalisent la consommation de services énergétiques et leur production. Le modèle maximise alors le surplus des consommateurs et des producteurs. Le modèle TIMES est donc un modèle à équilibre partiel.

Suivant le choix de l'utilisateur, l'horizon temporel est découpé en plusieurs périodes qui comprennent un nombre donné d'années. Chaque année peut être également subdivisée en saison, types de jours (ouvert ou fermé par exemple) et/ou heures.

## STRUCTURE DU MODÈLE TIMES-FRANCE

---

Le modèle TIMES-France est le modèle France développé au sein du Centre de Mathématiques Appliquées des MINES ParisTech et décrit le système énergétique de la France métropolitaine. Initié pour le secteur électrique (ASSOUMOU, 2006), il a été déployé à l'ensemble du secteur énergétique (MAÏZI et ASSOUMOU, 2007) dans le cadre notamment des projets européens NEEDS<sup>1</sup> et RES2020<sup>2</sup> par Edi Assoumou. Cette partie ainsi que les sections suivantes abordent les changements de structure du modèle apportés dans le cadre de cette thèse ainsi que le recalibrage des données et les hypothèses qui ont été retenus avec la mise à jour du modèle TIMES-France.

### B.1 REMARQUES GÉNÉRALES

Le système énergétique du modèle TIMES-France est désagrégé en plusieurs secteurs et peut être représenté en première approximation par le schéma de la [Figure A.1](#). Il comprend d'une part les secteurs de transformation de l'énergie (raffineries et cokeries dans le secteur Supply, la production d'électricité et de chaleur) et d'autre part les secteurs de consommation d'énergie finale : industrie, résidentiel, tertiaire, transport et agriculture. Les énergies fossiles comme le gaz naturel ou le charbon qui n'ont pas besoin d'être transformées proviennent directement des importations tandis que les autres énergies primaires comme les énergies renouvelables sont spécifiées suivant leurs gisements potentiels (ou ressources disponibles).

Chaque secteur de consommation d'énergie finale comprend plusieurs demandes de service énergétique. Le secteur de l'industrie est désagrégé en 23 branches (dont notamment les industries grandes consommatrices d'énergie), le secteur du transport en 15 types de demande de mobilité avec une distinction passagers et marchandises, les secteurs résidentiel et tertiaire en respectivement 6 et 20 types de demande dont notamment le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS) et la cuisson, et enfin le secteur de l'agriculture en 4 branches.

Le calibrage du système énergétique a été fait pour l'année 2014 à partir des données de consommations d'énergies fournies par Eurostat ce qui permet un niveau de désagrégation plus fin que les bilans fournis par le SOeS. Toutefois des différences subsistent entre les

---

1. New Energy Externalities Developments for Sustainability, FP6 European project

2. Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020, Intelligent Energy for Europe programme (RES2020, 2009)

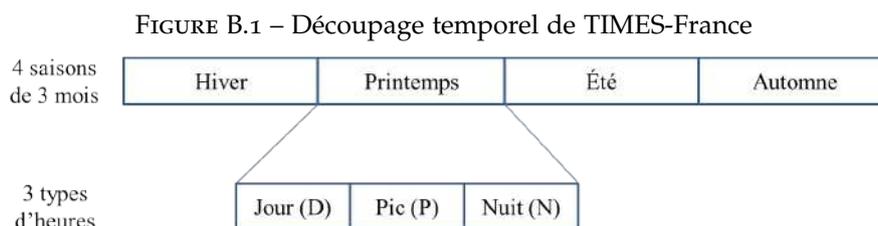
bilans de consommation d'énergie finale des deux entités qui peuvent s'expliquer par un périmètre différent (métropole ou France), et des transmissions de données décalées dans le temps. D'autres sources de données ont également été utilisées comme RTE pour la production d'électricité ou le CEREN pour les consommations d'énergies dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

À partir des consommations d'énergie, le modèle TIMES-France permet de calculer les émissions CO<sub>2</sub> associées et non l'ensemble des émissions de Gaz à effet de serre (GES) puisque seules les consommations d'énergies sont modélisées ; il comptabilise uniquement les émissions générées par la combustion d'énergies liées au fonctionnement du système énergétique, en se restreignant aux émissions CO<sub>2</sub>. Celles-ci représentent toutefois la majeure partie (près de 98 % en 2014, voir [Annexe C](#)) des émissions de GES liées à la combustion d'énergies ce qui constitue donc une bonne approximation pour réfléchir aux enjeux de la décarbonation du système énergétique. Par ailleurs, il est important de noter que l'année 2014 a été particulièrement favorable sur le plan climatique avec un hiver doux résultant en des émissions de GES relativement basses. Enfin d'importantes incertitudes entourent ces bilans d'émissions : pour l'année 2014, les variations associées au bilan totale des émissions de GES peuvent être de l'ordre de 10 % selon le CITEPA (voir DOUARD et al., 2017, p.66).

## B.2 LE DÉCOUPAGE TEMPOREL DU MODÈLE

L'horizon du modèle s'étend de 2014, année de calibrage du système énergétique à 2050. Cette période 2014-2050 est divisée en plusieurs pas de temps : les premiers ont une durée d'un an et à partir de 2021, les pas de temps ont une durée de 5 ans. Les résultats sont donnés pour chaque année médiane du pas de temps considéré soit 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 et 2050. On peut noter que l'horizon temporel peut facilement être repoussé jusqu'en 2100 et l'a été jusqu'en 2072 dans MILLOT et al. (2018).

Les années sont subdivisées en 4 saisons et 3 types de moments de la journée (D, N et P) ce qui donne 12 *Time Slices* (voir [Figure B.1](#)). Les 4 saisons correspondent à l'été, l'automne, l'hiver et le printemps. Le moment D de la journée correspond à la journée des jours ouvrés, N à la nuit des jours ouvrés ainsi qu'aux jours fériés, et P au *peak* d'un jour ouvré (les heures de la journée où la consommation est maximale). Ce fin découpage temporel permet de prendre en compte les variations de production de certaines technologies comme les panneaux photovoltaïques ainsi que les variations du niveau des demandes de service énergétique.



### B.3 INDUSTRIE

Le secteur de l'industrie est composé de plusieurs branches comme on peut le voir dans le [Tableau B.1](#). À chaque branche est associée une demande de service énergétique qui peut être exprimée en PJ d'énergie utile ou en tonne de production. La consommation d'énergie non énergétique est également représentée dans le secteur de l'industrie. On distingue la consommation non énergétique du secteur de la chimie de celle des autres secteurs.

TABLE B.1 – Demandes du secteur de l'industrie

DEMANDES DE SERVICE		CODE TIMES	UNITÉ
Sidérurgie		IIS	Mt
Métaux non ferreux	Aluminium	IAL	Mt
	Cuivre	ICU	Mt
	Autres métaux non-ferreux	INF	PJ
Produits chimiques	Ammoniac	IAM	Mt
	Chlore	ICL	Mt
	Autres produits chimiques	ICH	PJ
Minéraux non-métalliques	Ciment	ICM	Mt
	Chaux	ILM	Mt
	Verre creux	IGH	Mt
	Verre plat	IGF	Mt
	Autres minéraux non-métalliques	INM	PJ
Extraction		IEX	PJ
Alimentation et boissons		IFB	PJ
Textiles		ITC	PJ
Papier	Papier haute qualité	IPH	Mt
	Papier basse qualité	IPL	Mt
Construction mécanique		ITM	PJ
Travail du bois		ICO	PJ
Autres industries		IWO	PJ
Consommation non énergétique	Chimie	NEC	PJ
	Autres	NEO	PJ

Cette désagrégation très fine repose sur les bilans détaillés de consommation d'énergie finale d'EUROSTAT (2014) dans les différentes branches de l'industrie ainsi que sur les données EACEI de l'INSEE pour l'année 2014 (INSEE, 2014). Pour les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE), les technologies spécifiques à la branche sont modélisées ce qui permet d'exprimer la demande en tonnes produites. Les caractéristiques technico-économiques des technologies sont issues d'ASSOUMOU (2006), des programmes européens RES2020 (2009) et NEEDS (2009), ainsi que des rapports BAT (*Best available techniques*) (JRC, 2015) de la Commission européenne. Pour les autres branches, on désagrège la demande suivant les usages énergétiques (production de vapeur, production de chaleur, production d'électricité, procédés électrochimiques et autres) avec les données EACEI et on modélise des procédés génériques satisfaisant ces usages. La demande finale s'exprime alors en PJ.

### B.3.1 Sidérurgie

Le secteur de la sidérurgie fait partie des industries grandes consommatrices d'énergie. En 2014, la production se répartissait entre la filière à oxygène ou acier de première fusion (66 %) et la filière électrique ou acier de recyclage (34 %). L'ensemble de la chaîne de production est représentée : production d'aggloméré de minerai puis de fonte, production d'acier brut suivant les deux filières et enfin un processus représentant l'étape de finition. Celui-ci comprend toutes les consommations d'énergies qui n'ont pas été prises en compte dans les procédés précédents. Il correspond à la mise en forme ou à la fabrication d'aciers spéciaux.

Depuis les années 2000, la production d'acier a considérablement diminué passant à près de 21 000 ktonnes en 2000 à 14 500 ktonnes en 2016. Bien que des incitations soient mises en place pour décarboner le secteur de la sidérurgie au niveau européen à travers le système de quotas CO<sub>2</sub> (ETS), la part de la filière électrique dans la production de l'acier a diminué depuis 2000.

Dans les nouvelles technologies disponibles, outre les deux filières existantes, il est possible de recourir à de nouvelles technologies de production comme le procédé COREX, un procédé de réduction directe, un convertisseur cyclone ou le procédé AOD (Argon Oxygen Decarburization) pour la production de fonte et d'acier.

### B.3.2 Aluminium

Le secteur de l'aluminium fait partie des industries grandes consommatrices d'énergie. Pour la production d'aluminium en France, deux filières existent :

- un procédé de première fusion (dénommé Hall Heroult) : l'aluminium dit « primaire » est obtenue à partir de l'électrolyse d'alumine extraite de la bauxite,
- un procédé d'affinage : l'aluminium dit secondaire est obtenue à partir de matières recyclées.

En 2014, la production s'élevait à 570 kt (sans compter les 265 kt d'aluminium produit par recyclage direct) dont 33 % était produit par affinage. Cette part du recyclage (ou affinage) a légèrement diminué depuis les années 2000 puisqu'elle s'élevait à 38 % en 2000.

Les nouveaux procédés disponibles comprennent les procédés existants, des améliorations de ces procédés et un nouveau procédé par anode inerte.

### B.3.3 *Cuivre*

Le secteur du cuivre fait partie des industries grandes consommatrices d'énergie. La production de cuivre est faible en France : en 2014, elle s'élevait à 42 kt. Ce cuivre est obtenu uniquement par recyclage. Les nouveaux procédés comprennent un procédé de production classique du cuivre et un autre par recyclage.

### B.3.4 *Ammoniac*

La production d'ammoniac se fait à partir de diazote et de dihydrogène obtenu à partir du vaporéformage du gaz naturel. Le rendement de la réaction est faible, de l'ordre de 20 %. En 2014, la production s'élevait à 910 kt.

Les nouveaux procédés disponibles pour la production d'ammoniac comprennent le procédé actuel et des procédés améliorés par rapport à celui-ci au niveau du rendement d'utilisation du gaz.

### B.3.5 *Chlore*

Le chlore est obtenu par électrolyse d'une solution de chlorure de sodium qui peut avoir lieu dans trois types de cellule : mercure, diaphragme ou membrane. Les nouvelles unités de production fonctionnent généralement avec des cellules à membrane. Les trois types de production sont modélisés pour l'année de base mais les nouvelles technologies disponibles comprennent uniquement des procédés à membrane améliorés. En 2014, la production en France s'élevait à 996 kt.

### B.3.6 *Ciment et Chaux*

Le ciment et la chaux s'obtiennent à partir de la décomposition du carbonate de calcium dans des fours rotatifs à très haute température (1400°C). En sortie du four, on obtient soit de la chaux soit du clinker qui permet par la suite d'obtenir le ciment. En 2014, la production de ciment s'élevait à 16 Mt et celle de chaux à près de 3 Mt.

Pour la production de clinker, on distingue deux voies de fabrication dans le modèle : la voie humide et la voie sèche. En France, la voie sèche est majoritaire. On modélise également une étape de production de chaleur via des procédés de chaudière différenciés par type de combustible. Un procédé de finition permet d'obtenir le ciment.

La production de chaux est modélisée par une étape de production de chaleur par chaudière puis par un procédé de décarbonatation qui produit la chaux.

Les nouveaux procédés correspondent aux procédés existants ainsi que des variantes améliorées au niveau du rendement.

### B.3.7 *Verre*

Pour la production de verre, on distingue le verre creux du verre plat. En 2014, en France, la production de verre creux représente plus de 80 % de la production de verre (3 400 kt pour le verre creux et 700 kt pour le verre plat).

Le verre est obtenu par fusion à haute température du sable (silice) ainsi que du carbonate de sodium dans des fours fonctionnant au gaz, au fioul ou à l'électricité. Une partie de la production de verre est réalisée à partir de calcin, c'est-à-dire du verre recyclé qui a été broyé. Le calcin est majoritairement utilisé pour la production de verre creux où certains fours peuvent employer jusqu'à 90 % de calcin.

Pour l'année de base, deux procédés permettent de fabriquer du verre creux, un à partir de matières recyclées, l'autre à partir de matières brutes. Un seul procédé conduit à la production de verre plat. Les nouvelles technologies comprennent les mêmes procédés améliorés.

### B.3.8 *Papier*

Pour produire du papier, la première étape consiste à produire de la pâte à papier. Cette pâte est obtenue à partir de bois et/ou de papier recyclé suivant un procédé mécanique ou chimique. On distingue ensuite la production de papier de haute qualité de celui de basse qualité. Cette qualité dépend des additifs ajoutés (kaolin, gypse).

Pour l'année de base, on modélise des chaudières permettant de produire la chaleur nécessaire au fonctionnement des différents procédés au nombre de trois : chimique, mécanique et un à partir de

matières recyclées. Deux procédés de finition permettent d'obtenir le papier de basse et de haute qualité.

La production de co-produits comme la liqueur noire ou la biomasse industrielle est également représentée et ceux-ci peuvent être réutilisés en auto-production pour produire la chaleur nécessaire aux procédés de fabrications de pâte à papier.

### B.3.9 *Autres branches*

La branche « Autres métaux non-ferreux » permet de représenter les consommations énergétiques qui n'ont pas été affectées à la production d'aluminium et de cuivre.

La branche « Autres produits chimiques » permet de représenter les consommations énergétiques qui n'ont pas été affectées à la production d'ammoniac et de chlore.

La branche « Autres minéraux non-métalliques » permet de représenter les consommations énergétiques qui n'ont pas été affectées à la production de ciment et de verre.

Les autres branches tirent leur bilan directement des consommations d'énergies d'Eurostat.

Pour chacune des branches, on distingue les différents usages de l'énergie à partir des données de l'EACEI (INSEE, 2014) : vapeur, chauffage, production d'électricité, procédés électrochimiques et autres usages. Ce sont ces différents usages qui permettent de produire une unité finale de production dans la branche. Pour chacun de ces usages, les procédés sont distingués suivant leurs combustibles.

### B.3.10 *Hypothèses générales*

Les taux de croissance maximal d'évolution de la part des différentes énergies dans la consommation d'énergie finale de l'industrie sont présentés dans le [Tableau B.2](#).

TABLE B.2 – Taux annuel d'évolution dans l'industrie

ÉNERGIE	CROISSANCE
Gaz	3 %
Pétrole	3 %
Charbon	2 %
Biomasse	2 %
Électricité	3 %
Chaleur	5 %

Les hypothèses concernant les taux de recyclage sont présentées dans le [Tableau B.3](#) et sont dérivées de rapport de l'ADEME (ADEME

et BIO BY DELOITTE, 2017, 2015) et des hypothèses utilisées par la DGEC (BEPM, 2015a).

TABLE B.3 – Taux de recyclage dans l'industrie

	2014	2030	2050
Acier	47 %	50 %	55 %
Aluminium	44 %	62 %	62 %
Verre	73 %	80 %	85 %
Papier	68 %	70 %	75 %

#### B.4 TRANSPORT

Dans le secteur du transport, on distingue le transport de passagers du transport de marchandises. Les demandes de mobilité sont présentées dans le [Tableau B.4](#).

Le transport courte distance désigne les trajets de moins de 100 km. Concernant le transport ferré, le ferré « léger » correspond aux déplacements par métro. Le ferré « lourd » correspond au transport ferroviaire classique.

Le calibrage du secteur du transport s'est basé sur les données Eurostat de consommation d'énergie finale et sur le Compte des Transports en 2014 (CGDD, 2015)<sup>3</sup>.

##### B.4.1 *Transport routier*

Le transport routier représente la majorité des émissions CO<sub>2</sub> (près de 95 %) du secteur du transport. Les technologies sont donc plus détaillées que pour les autres types de transport. Par ailleurs on distingue le transport passagers du transport marchandises.

**Voitures** Les différentes technologies disponibles comprennent les voitures essences, diesel, GNV (gaz naturel pour véhicules), électriques, hybrides, hybrides rechargeables, hydrogènes et à pile à combustibles dont les coûts d'investissements sont tirés du JRC (SIMOES et al., 2013) et sont présentés dans le [Tableau B.5](#). Les technologies sont différenciées suivant les gammes des voitures et les classes de distance. Quatre gammes ont été introduites qui correspondent aux gammes inférieure, moyenne inférieure, moyenne supérieure et supérieure. Pour chaque classe de distance, 54 % des nouvelles voitures doivent appartenir à la première gamme, 28 % à la deuxième, 12 % à la troisième et

3. On pourra noter que les années suivantes un important changement de méthodologie a entraîné une révision à la baisse du transport de voyageurs. Pour l'année 2014, le transport intérieur de voyageur avec véhicule particuliers est ainsi passé de 829,6 Mds de voyageurs-kilomètres à 720,9 dans les données publiées en 2016.

TABLE B.4 – Demandes du secteur du transport

DEMANDES DE SERVICE		CODE TIMES	UNITÉ
<b>Transport de passagers</b>			
Transport routier individuel	Voiture Courte distance	TCS	MillionsVoyKm
	Voiture Longue distance	TCL	MillionsVoyKm
	Moto	TMO	MillionsVoyKm
	Véhicule utilitaire	TVUP	MillionsVoyKm
Transport routier collectif	Bus urbain	TBU	MillionsVoyKm
	Bus intercity	TBI	MillionsVoyKm
Transport ferroviaire	Ferré « lourd »	TTP	MillionsVoyKm
	Ferré « léger »	TTL	MillionsVoyKm
<b>Transport de marchandises</b>			
Transport routier	Véhicule utilitaire	TVUF	MillionsTonnesKm
	Poids Lourds	TFR	MillionsTonnesKm
Transport ferroviaire		TTF	MillionsTonnesKm
<b>Aviation</b>			
Aviation nationale		TAVD	PJ
Aviation internationale		TAVI	PJ
<b>Maritime</b>			
Maritime national		TNAI	PJ
Maritime international		TNAB	PJ

5 % à la quatrième ce qui correspond aux ventes actuelles d'après les statistiques 2015 du CCFA (2015). On prolonge donc la situation actuelle jusqu'à la fin de l'horizon. Pour les classes de distance, on distingue 6 types dénommés D1 à D6 : les voitures parcourant jusqu'à 6 000 km, 8 000 km, 10 000 km, 14 000 km, 16 000 km et 18 000 km. Ces valeurs correspondent à une plage possible autour de la moyenne basse (8 000 km) et haute (16 000 km) parcourues par les voitures. Par conséquent on considère que les nouvelles voitures de type D1, D3, D4 et D6 doivent représenter 12,5 % chacune du total des nouvelles voitures, tandis que les voitures de classe D2 et D6 doivent chacune représenter 25 % du total.

Enfin, les caractéristiques technico-économiques de ces différentes voitures (modulation suivant la gamme et la classe de distance) ont été adaptées avec des facteurs de correction par rapport aux valeurs présentées par défaut. Ces facteurs de correction ont été calculés à partir des données de voitures actuelles fournies par l'Argus et le CCFA.

TABLE B.5 – Coûts d'investissement des voitures en k€/véhicule

TYPE	2015	2030	2050
Essence	20,78	20,44	20,40
Essence hybride	23,87	21,72	21,20
Essence PHEV*	30,75	25,54	23,42
Diesel	22,57	22,23	22,20
Diesel hybride	25,97	23,67	23,16
Diesel PHEV*	32,16	26,96	24,86
Biodiesel	22,57	22,23	22,20
GPL**	22,11	22,11	21,79
GNV	24,95	24,50	24,36
GNV hybride	26,97	24,05	23,26
GNV PHEV*	36,92	30,61	27,97
Électrique	41,05	29,70	26,59
H <sub>2</sub>	25,82	25,41	25,36
H <sub>2</sub> hybride	31,63	28,64	28,59
H <sub>2</sub> Fuel Cell***	35,10	29,12	25,73
H <sub>2</sub> Fuel Cell Hybride***	38,82	31,06	27,44

\*PHEV : *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*

\*\*GPL : Gaz de pétrole liquéfié

\*\*\*Fuel Cell : Pile à combustible

Chaque voiture permet de satisfaire à la fois de la courte distance et de la longue distance avec une part minimale pour chaque mode. Le taux de remplissage est fixé à 1,7 passager/véhicule (POCHEZ, WAGNER et CABANNE, 2016, voir).

**Moto** Les motos fonctionnent à l'essence pour l'année de départ. Les technologies disponibles après l'année de départ comprennent des motos à essence et des motos fonctionnant à l'électricité.

**Bus** On distingue le transport par bus urbain des bus intercités. Pour chaque catégorie, les différentes technologies de bus sont les suivantes : diesel, biodiesel, gaz, H<sub>2</sub>, Fuel Cell. Les bus électriques sont également disponibles pour les bus urbain.

**Poids Lourds** Pour l'année de base, on considère qu'il y a uniquement des poids lourds fonctionnant au diesel. Les différentes technologies disponibles par la suite sont les suivantes : diesel, biodiesel, gaz et essence.

**VUL** On distingue les véhicules utilitaires légers (**VUL**) pour les passagers de ceux pour les marchandises. Les différentes technologies de **VUL** sont calquées sur les voitures pour les **VUL** passagers et sur les poids lourds pour les **VUL** marchandises, c'est-à-dire que le ratio d'efficacité (ou des coûts d'investissement) observé pour l'année de départ entre le **VUL** et la voiture (ou le poids lourd) est reporté pour les nouvelles technologies.

#### B.4.2 *Transport ferroviaire*

En l'absence de données permettant de décrire plus finement ce secteur, on distingue les consommations énergétiques associées à chaque demande et on associe une technologie générique qui reproduit les consommations de l'année de base. On fait toutefois l'hypothèse que le diesel consommé sera en partie remplacé par de l'électricité : on fait passer la proportion de diesel consommé de 22 % pour le transport passager et 25 % pour le transport marchandises à 10 % en 2030 et devient nulle à partir de 2040. Cette hypothèse concorde avec le mouvement d'électrification des lignes prônées par la SNCF (LE MONDE AVEC AFP, 2006; SIMIAN, 2018). Le transport léger de passager est considéré comme fonctionnant uniquement à l'électricité.

#### B.4.3 *Transport maritime et aérien*

Les technologies associées à ces secteurs correspondent à des technologies génériques qui améliorent les caractéristiques des consommations de l'année de base de 20 % en 2050 pour l'aviation (national et international) et de 10 % pour le maritime (nationale et internationale) par rapport à 2014. Ces hypothèses ont été adaptées des résultats présentés dans les rapports de TECOLOTE RESEARCH (2015) et POCHEZ, WAGNER et CABANNE (2016)

#### B.4.4 *Hypothèses générales*

**Taux d'évolution maximale des énergies** Voir [Tableau B.7](#).

TABLE B.7 – Taux annuel d'évolution dans le transport

ÉNERGIE	CROISSANCE	DÉCROISSANCE
Diesel	5 %	-5 %
Essence	5 %	-5 %

**Importations de biocarburant** Elles sont limitées à 3 Mtep.

**Évolution de la taxe pour chaque type d'énergie** On applique une convergence de la fiscalité essence et diesel.

## B.5 RÉSIDENTIEL

Dans le secteur résidentiel, on distingue les habitations collectives ou appartements des maisons individuelles. Les demandes sont présentées dans le [Tableau B.8](#).

TABLE B.8 – Demandes du secteur résidentiel

DEMANDES DE SERVICE		CODE TIMES	UNITÉ
Chauffage	Maison individuelle	RHSE	PJ
	Appartement	RHME	PJ
ECS	Maison individuelle	RWSE	PJ
	Appartement	RWME	PJ
Cuisson		RCOK	PJ
Électricité spécifique		ROEL	PJ

Le calibrage de ce secteur s'est appuyé sur les données Eurostat de consommation d'énergie finale pour l'année 2014 et sur les données CEREN (2018a) pour la répartition de chaque type d'énergie suivant les services énergétiques associés (chauffage, ECS, cuisson ou électricité spécifique) ainsi que pour les surfaces de logement associées.

Pour les logements collectifs, on obtient une consommation d'énergie finale de 99 kWh/m<sup>2</sup>/an de chauffage tandis que pour les logements individuels, on obtient 100 kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette faible différence s'explique en partie par le fait que les appartements à chauffage collectifs ont une consommation plus élevée de chauffage que les maisons individuelles qui consomment elles-mêmes plus que les appartements à chauffage individuel. En moyenne, on obtient donc des besoins de chauffage équivalents. Ces valeurs semblent de plus cohérentes avec les valeurs présentées par l'ADEME dans sa publication Chiffres énergie-climat de 2012 (ADEME, 2012).

Les nouvelles technologies disponibles sont présentées dans le [Tableau B.9](#). Les coûts d'investissement, de fonctionnement et les durées de vie sont tirées du rapport du JRC (SIMOES et al., 2013).

Par ailleurs, en l'absence d'informations sur l'âge du parc de chaudières et des différents équipements, on retient les hypothèses d'évolution présentées dans le [Tableau B.10](#) pour la consommation finale des énergies.

Concernant l'isolation, les données ont été tirées de l'enquête Phébus fournie par EDF (communication personnelle). Les gisements d'isolation sont différenciés suivant le type d'habitat (maisons individuelle

TABLE B.9 – Technologies du secteur résidentiel

ÉNERGIE	DESCRIPTION	CHAUFFAGE	ECS	CHAUFFAGE + ECS
<b>Électricité</b>	High temperature radiators	ELC101		
	Air to air heat pumps	ELCHP201/ELCHP301	ELCHP201	
	Ground to water heat pumps	ELCHP401		
	Water heater		ELC101	
<b>Gaz</b>	Stove	GAS101		
	New gas boilers	GAS201	GAS101	GAS301
	New gas furnaces condensing	GAS401		GAS501
	Gas absorption heat pumps	GASHP601		
<b>GPL</b>	Stove	LPG101		
	Boiler	LPG201	LPG101	LPG301
	Air to air heat pumps	LPGHP401		LPGHP501
<b>Hydrogène</b>	H2 burner	HYD110		
<b>Réseau de chaleur</b>	Réseau de chaleur		LTH101	LTH101
<b>Fioul</b>	Stove	OIL101	OIL101	
	Boiler	OIL201		OIL301
	Boiler condensing			OIL401
<b>Biomasse</b>	Wood fireplace	BIO101		
	Stove	BIO201		
	Biodiesel Boiler			BIO101
	Wood pellets Biomass boiler		BIO101	WOO101
<b>Solaire thermique</b>	Solar collector (electric backup)		SOLD101	SOLD101
	Solar collector (diesel backup)		SOLE601	SOLE601
	Solar collector (gas backup)		SOLG201	SOLG201
<b>Fuel Cell</b>	Gas Fuel Cell		FCW110	

TABLE B.10 – Taux annuel d'évolution

ÉNERGIE	CROISSANCE	DÉCROISSANCE
Gaz	5 %	-5 %
Fioul	6 %	-6 %
Biomasse	5 %	-5 %
Électricité	6 %	-5 %

ou appartement), suivent le type de travaux réalisés (allant de la rénovation des fenêtres à la rénovation des combles). Le potentiel total est de 84 TWh pour les logements individuels et de 59 TWh pour les logements collectifs.

## B.6 TERTIAIRE

Dans le secteur tertiaire, les demandes de service énergétique final (chauffage, cuisson, etc.) sont les mêmes que dans le secteur résidentiel, mais on distingue les différentes branches du tertiaire comme on peut le voir dans le [Tableau B.11](#) sauf pour la cuisson et l'électricité spécifique qui sont regroupés pour toutes les branches. Par ailleurs on distingue la demande d'électricité pour l'éclairage public des besoins en électricité spécifique.

Comme dans le résidentiel, le calibrage s'est appuyé sur les données Eurostat de consommation d'énergie finale pour l'année 2014 et sur les données CEREN ([2018b](#)) pour la répartition de chaque type d'énergie dans les services énergétiques (chauffage, ECS, cuisson ou électricité spécifique) ainsi que pour les surfaces associées.

Les nouvelles technologies sont présentées dans le [Tableau B.12](#). Les coûts d'investissement, de fonctionnement et les durées de vie sont tirées du rapport du JRC (SIMÕES et al., [2013](#)).

Comme dans le secteur résidentiel, des contraintes sur les évolutions minimales et maximales des différentes énergies dans la consommation d'énergie finale sont introduites : pour chaque énergie, le taux de croissance annuel maximum est de 6 % et le taux de décroissance est de 5 %.

Concernant l'isolation, le potentiel est de 40 TWh réparti dans les différentes branches au prorata de leur surface.

TABLE B.11 – Demandes du secteur tertiaire

DEMANDES DE SERVICE	CODE TIMES	UNITÉ	
Chauffage	Bureaux	CHBE	PJ
	Café, hôtel, restaurant	CHRE	PJ
	Commerce	CHCE	PJ
	Enseignement	CHEE	PJ
	Habitat communautaire	CHHE	PJ
	Santé	CHSE	PJ
	Sports, loisirs, culture	CHLE	PJ
	Transport	CHTE	PJ
ECS	Bureaux	CWBE	PJ
	Café, hôtel, restaurant	CWRE	PJ
	Commerce	CWCE	PJ
	Enseignement	CWEE	PJ
	Habitat communautaire	CWHE	PJ
	Santé	CWSE	PJ
	Sports, loisirs, culture	CWLE	PJ
	Transport	CWTE	PJ
Cuisson	CCOK	PJ	
Électricité spécifique	COEL	PJ	
Éclairage public	CPLI	PJ	
Autres	ONE	PJ	

TABLE B.12 – Technologies du secteur tertiaire

ÉNERGIE	DESCRIPTION	CHAUFFAGE	ECS	CHAUFFAGE + ECS
<b>Électricité</b>	High temperature radiators	ELC101		
	Electric boiler	ELC201		
	Air to air heat pumps	ELCHP201/ELCHP301	ELCHP201	
	Ground to water heat pumps	ELCHP401		
	Water heater		ELC101	
<b>Gaz</b>	Stove	GAS101		
	New gas boilers	GAS201	GAS101	GAS301
	New gas furnaces condensing	GAS401		GAS501
	Gas absorption heat pumps	GAS601		
<b>GPL</b>	Boiler	LPG201	LPG101	LPG301
<b>Réseau de chaleur</b>	Réseau de chaleur		LTH101	LTH101
<b>Fioul</b>	Boiler	OIL201	OIL101	OIL301
	Boiler condensing			OIL401
<b>Biomasse</b>	Wood pellets			WOO101
	Biomass boiler		BIO101	
<b>Solaire thermique</b>	Solar collector (electric backup)		SOLE601	SOLE601
	Solar collector (diesel backup)		SOLD101	SOLD101
	Solar collector (gas backup)		SOLG201	SOLG201
<b>Géothermie</b>	Geothermal heat exchanger		GEO101	
<b>Fuel Cell</b>	Gas Fuel Cell	FCH110	FCW110	

## B.7 AGRICULTURE

Les demandes dans l'agriculture ont été désagrégées d'après l'enquête sur les consommations et les productions d'énergie dans les exploitations agricoles de 2011 (AGRESTE, 2014) et sont présentées dans le [Tableau B.13](#).

TABLE B.13 – Demandes du secteur de l'agriculture

DEMANDES DE SERVICE	CODE TIMES	UNITÉ
Bâtiments	AGRBUI	PJ
Transformation	AGRPRO	PJ
Tracteurs	AGRTRA	PJ
Autres	AGROTH	PJ

Les technologies satisfaisant ces demandes sont génériques : les énergies en entrée satisfaisant ces demandes ne changent pas en proportion pour tout l'horizon. Les tracteurs sont cependant différenciés avec de nouvelles technologies permettant de satisfaire la demande tracteur non plus uniquement à partir de pétrole mais également de gaz, d'électricité et de biodiesel.

## B.8 PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET DE CHALEUR

B.8.1 *Production d'électricité*

Le calibrage du parc de production d'électricité s'est fait à partir des données fournies par RTE pour l'année 2014. Le parc se répartit comme dans le [Tableau B.14](#).

**Nucléaire** Concernant le parc nucléaire existant, on fait l'hypothèse d'une durée de vie de 40 ans. Comme les centrales nucléaires ont été construites en France sur une période courte, cette hypothèse conduit à une décroissance rapide des capacités installées comme on peut le voir dans la [Figure B.2](#). Il est à noter que pour Fessenheim, on suppose que la fermeture a lieu en 2019, année de raccordement du nouvel EPR de Flamanville. Les centrales de Bugey sont supposées fermées en 2020.

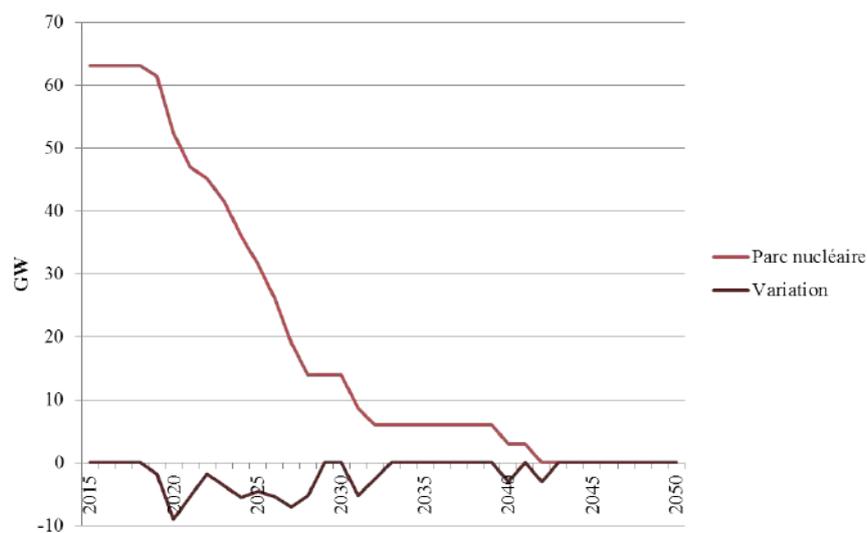
Par ailleurs on impose l'installation d'une nouvelle centrale nucléaire d'une puissance de 1,65 GW correspondant à l'EPR de Flamanville (ce raccordement n'est pas représenté dans la [Figure B.2](#)). On interdit par ailleurs la construction de nouvelles centrales nucléaires jusqu'en 2021. Le temps de construction d'une centrale nucléaire étant supérieur à 5 ans, on peut raisonnablement supposer qu'aucune centrale nucléaire ne rentrera en service avant 2025.

TABLE B.14 – Parc de production d'électricité en 2014

PARC	PUISSANCE (GW)
Éolien terrestre	9,3
Éolien en mer	0,0
Solaire PV	5,3
Bioénergies	1,6
STEP	4,3
Hydraulique fil de l'eau	7,7
Hydraulique éclusée	3,9
Hydraulique usines de lac	9,6
Cycles combiné gaz	5,3
Charbon	4,5
Fioul	5,3
Turbines à combustion	1,9
<i>Dont fioul</i>	1,5
<i>Dont gaz</i>	0,4
Parc thermique décentralisé	6,5
<i>Dont diesel</i>	2,0
<i>Dont gaz</i>	4,5
Nucléaire	63,1

PV : Photovoltaïque  
 STEP : Stations de transfert d'énergie par pompage

FIGURE B.2 – Évolution du parc nucléaire existant



**ENR** Les facteurs de charge de l'éolien et du solaire sont calibrés sur l'année 2014 d'après les données RTE. Ils sont présentés dans le [Tableau B.15](#).

TABLE B.15 – Facteur de charge moyen par *Time Slice* (TS)

TS	RD	RN	RP	SD	SN	SP	FD	FN	FP	WD	WN	WP
Éolien	19 %	23 %	22 %	14 %	16 %	16 %	18 %	19 %	19 %	32 %	33 %	33 %
Solaire	37 %	8 %	10 %	41 %	9 %	15 %	29 %	6 %	3 %	16 %	3 %	0 %

Les potentiels d'éolien et de solaire sont présentés dans le [Tableau B.16](#).

TABLE B.16 – Potentiel de l'éolien et du solaire

ENR	2030	2050
Solaire	30	90
<i>Solaire toiture</i>	12	43
<i>Centrale solaire</i>	18	47
Éolien terrestre	34	55
Éolien maritime	12	21

**Les nouvelles technologies** Les coûts d'investissement des nouvelles technologies disponibles sont présentés dans le [Tableau B.17](#) et sont tirés du WEO 2016 New Policies. Le nucléaire existant peut être prolongé pour 20 ans pour 1 200 €/kW suivant en cela les hypothèses prises par RTE dans leur bilan prévisionnel 2017 (RTE, 2017a).

Les technologies avec capture du carbone peuvent être installées à partir de 2025 mais la séquestration dans le sol n'est possible qu'à partir de 2030. Les installations des nouvelles capacités de production doivent respecter les contraintes présentées dans le [Tableau B.18](#).

**Exportation et importation d'électricité** La quantité minimale d'électricité à exporter décroît linéairement de la valeur de 2015, 93,5 TWh jusqu'à 0 en 2050. Les importations d'électricité sont limitées à 27,3 TWh en 2014 et la contrainte croît linéairement jusqu'à 32 TWh en 2050.

### B.8.2 Production de chaleur

La production de chaleur est calibrée à partir des données Eurostat et des données fournies par le CEREMA sur les réseaux de chaleur.

La chaleur est produite d'une part par des centrales de cogénération et d'autre part par des chaudières qui sont distinguées suivant leur type de combustibles : charbon, pétrole, gaz, bois, déchets ou géother-

TABLE B.17 – Coûts d'investissement des moyens de production d'électricité

TYPE	2015	2030	2050
Nucléaire			
Nucléaire de 3 <sup>ème</sup> génération	8715		5982
Nucléaire de 4 <sup>ème</sup> génération		8500	6500
Charbon			
TAV Charbon	1505	1505	1505
TAV Charbon + CCS	4870	4427	4250
IGCC Charbon	2213	2081	2036
IGCC Charbon + CCS	5179	4648	4383
Fioul			
TAC Fioul	775	775	775
TAV Fioul	1697	1635	1603
Gaz			
Cycle combiné gaz Petit	977	977	977
Cycle combiné gaz Grand	885	885	885
Cycle combiné gaz + CCS	2745	2479	2346
TAC gaz	443	443	443
Hydraulique			
Hydraulique lac	2346	2346	2319
Hydraulique STEP	2346	2346	2319
Hydraulique fil de l'eau Grand	2346	2346	2319
Hydraulique fil de l'eau Moyen	3687	3687	3644
Hydraulique fil de l'eau Petit	3922	3922	3876
Biomasse			
IGCC biomasse	2535	2294	2225
IGCC biomasse + CCS	6296	5724	5495
TAV Biomasse	2125	2036	1969
TAV HT Biomasse	1779	1705	1649
Solaire			
PV en toiture	1417	956	858
Centrale PV au sol	1169	761	683
Solaire thermique	5047	3763	3281
Eolien			
Éolien en mer	4073	2833	2538
Éolien terrestre	1629	1523	1470
Autres			
TAV Déchets	1939	1859	1797
Géothermie	2568	2390	2275
Fuel Cell			
Fuel Cell MCFC Biogaz	5902	2951	2951
Fuel Cell MCFC Gaz	5902	2951	2951
Fuel Cell SOFC Biogaz	4722	2361	2361
Fuel Cell SOFC Gaz	4427	2213	2213

TAV : Turbine à vapeur  
TAC : Turbine à combustion  
IGCC : Cycle combiné à gazéification intégrée  
MCFC : Molten-carbonate fuel cell  
SOFC : Solid oxide fuel cell

TABLE B.18 – Contrainte annuelle maximale d’installation

TYPE CENTRALE	2015-2035	2035-2050
Nucléaire	1,6 GW/an	3,2 GW/an
Éolien terrestre	1,8 GW/an	2,2 GW/an
Éolien offshore	1 GW/an	
Centrales solaires	2,9 GW/an	3,2 GW/an
Centrales thermiques	2 GW/an	
Centrales électriques avec CCS	1 GW/an	
Power to gas	2 GW/an	

mie. On différencie la production de chaleur à haute température de la chaleur à basse température pour les capacités existantes. Le potentiel de géothermie est fixé à 550 ktep d’après les données du CEREMA.

## B.9 SUPPLY

Le secteur *Supply* ou approvisionnement d’énergie regroupe le raffinage du pétrole ainsi que les cokeries. L’extraction de gaz et de pétrole en fait également partie mais étant une activité marginale en France, elle n’est pas représentée. On inclue également la transformation du biogaz en biométhane dans ce secteur. La filière biogaz, sa transformation en biométhane, la production de syngaz ainsi que la filière *power-to-gas* a été reprise des travaux de (DOUDARD, 2018).

**Biomasse** Le potentiel de biomasse est présenté dans le [Tableau B.19](#)

TABLE B.19 – Potentiel en Mtep de biomasse

TYPE	2014	2050
Importations de biocarburants	0,4	3,0
Biogaz	0,5	6,0
Biofuel	2,6	2,7
Déchets municipaux	1,4	5,4
Déchets industriels	0,4	0,4
Produits bois	8,3	21,5
<b>Total</b>	<b>13,5</b>	<b>39,1</b>

**CCS** Comme mentionné plus haut, les technologies de production d’électricité associées à du CCS (capture et séquestration du carbone) sont disponibles à partir de 2025. Le CCS peut également être déployé sur les technologies de purification du biogaz en biométhane à partir

de 2030. Les technologies CCS dans l'industrie sont disponibles à partir de 2030. En plus des procédés décrits dans le modèle permettant de faire du CCS dans les IGCE, on considère qu'il est possible d'ajouter dans l'industrie une technologie générique, permettant de capturer les émissions CO<sub>2</sub> au coût de 225 €/tCO<sub>2</sub> (compilé à partir de rapports de l'AIE (2011), de la ZEP (2011) et d'hypothèses pris dans le cadre de la commission Quinet). Le potentiel d'activité de séquestration dans l'industrie passe de 1,5 Mt en 2030 à 13,9 Mt en 2050 (et 56,1 Mt en 2060 limite maximale). Le potentiel de stockage total de carbone passe de 1,5 Mt en 2030 à 40 Mt par an en 2050. Le gisement de 40 Mt correspond à la valeur basse retenue par le rapport du BRGM (MICHEL et MENARD, 2009). Celui-ci, publié il y a 10 ans présente quatre scénarios d'évolution de la filière CCS et envisage pour 2050 des potentiels de séquestration allant de 40 à 66 Mt.

## BILANS DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFETS DE SERRE

---

Le [Tableau C.1](#) présente les émissions associées à la combustion de l'énergie (catégorie CRF 1A). Cette catégorie représente près de 70 % de l'ensemble des émissions de [GES](#).

Par ailleurs, en repartant du bilan d'énergie fourni par Eurostat et en calculant les émissions à partir de ce bilan en associant un facteur d'émission à chaque vecteur énergétique (rapport du JRC), on constate des différences importantes suivant les branches comme on peut le voir dans le [Tableau C.2](#). Cependant, le total correspond à 94 % de celui donné par le CITEPA. Par ailleurs certains réajustements opérés dans le bilan Eurostat lors de la calibration du modèle TIMES atténuent légèrement ces différences, et les émissions totales dans le modèle sont même légèrement supérieures à celles du CITEPA. En conclusion, les marges d'erreur dues aux mesures des émissions ou à la méthodologie de comptabilité sont très certainement supérieures aux erreurs dues à la modélisation du système énergétique. Nous avons donc une bonne approximation des émissions françaises actuelles.

TABLE C.1 – Émissions de GES et CO<sub>2</sub> en France

	1990			2014		
	GES	CO <sub>2</sub>	%	GES	CO <sub>2</sub>	%
<b>Total With LULUCF</b>	520 595			413 627		
<b>Total Without LULUCF</b>	547 074			453 487		
<b>Total CRF<sub>1</sub></b>	380 316	364 477	96 %	311 002	304 431	98 %
A. Fuel combustion activities	369 374	360 148	98 %	306 720	301 391	98 %
1. Energy industries	66 446	66 061	99 %	40 031	39 767	99 %
2. Manufacturing industries and construction	82 110	81 384	99 %	51 546	51 063	99 %
3. Transport	120 655	118 705	98 %	131 409	129 674	99 %
4. Other sectors	100 163	93 997	94 %	83 734	80 887	97 %
B. Fugitive emissions from fuels	10 942	4 330	40 %	4 282	3 040	71 %

Source : Tables CRF 2017 du CITEPA

TABLE C.2 – Comparaison des émissions CO<sub>2</sub> entre le bilan CITEPA et le calcul à partir du bilan d'énergie finale d'Eurostat pour l'année 2014

	CITEPA	CALCUL
<b>1A. Fuel combustion activities</b>	<b>301 391</b>	<b>284 710</b>
1. Energy industries	39 767	27 760
a. Public electricity and heat production	28 572	18 947
b. Petroleum refining	7 927	8 813
c. Manufacture of solid fuels and other energy industries	3 269	
2. Manufacturing industries and construction	51 063	53 588
a. Iron and steel	13 286	15 547
b. Non-ferrous metals	773	897
c. Chemicals	11 108	10 303
d. Pulp, paper and print	2 903	2 783
e. Food processing, beverages and tobacco	7 404	8 307
f. Non-metallic minerals	9 079	8 344
g. Other (please specify)	6 510	7 407
3. Transport	129 674	124 948
a. Domestic aviation	4 519	2 426
b. Road transportation	123 001	120 564
c. Railways	410	455
d. Domestic navigation	1 283	1 502
e. Other transportation	461	
4. Other sectors	80 887	78 414
a. Commercial/institutional	24 765	24 789
b. Residential	44 964	42 508
c. Agriculture/forestry/fishing	11 159	11 116

Source : Tables CRF 2017 du CITEPA et calcul à partir des données Eurostat 2017 pour l'année 2014

## ÉVOLUTION DU MIX ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE DANS CHAQUE SECTEUR

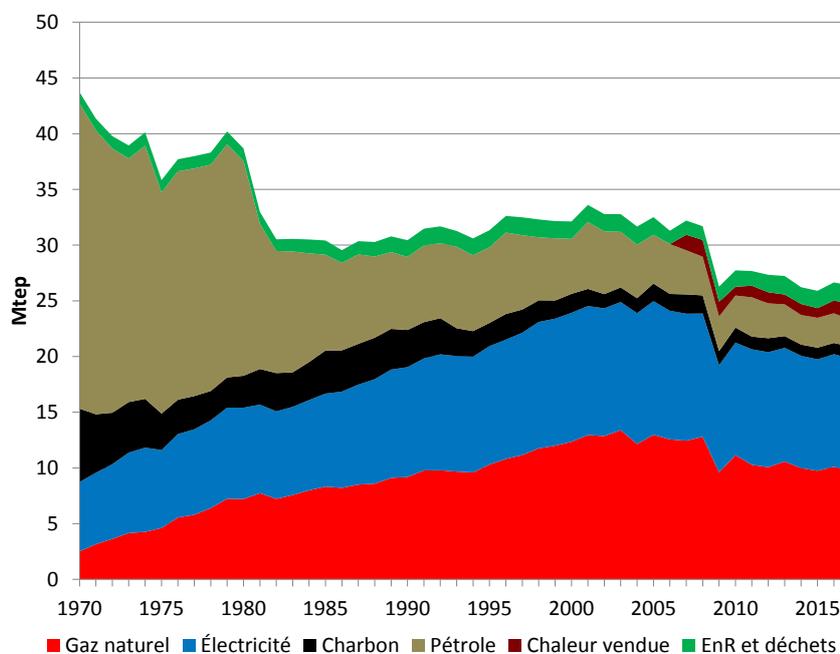


FIGURE D.1 – Consommation d'énergie finale dans le secteur de l'industrie

Source : SDES, MTES

Champ : métropole, consommations réelles

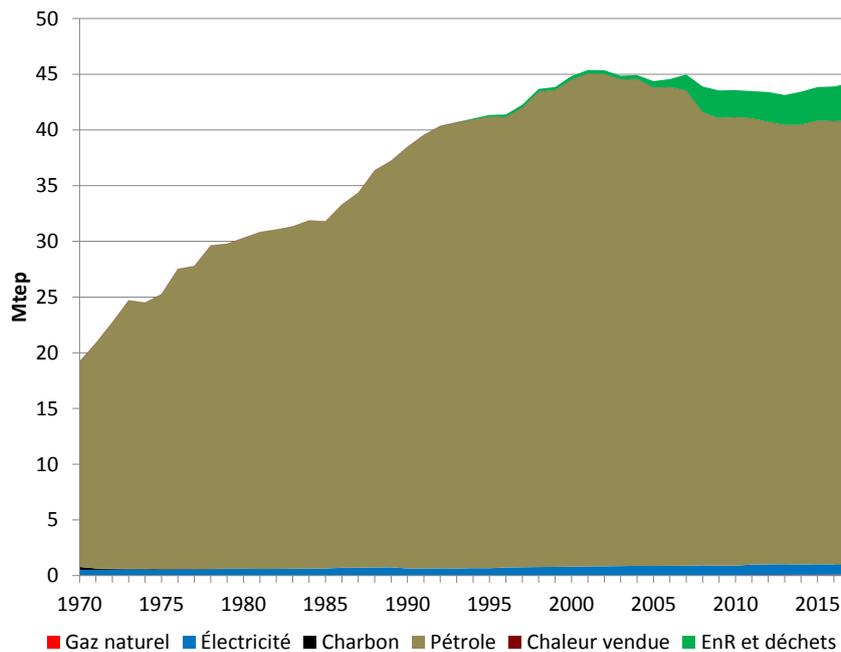


FIGURE D.2 – Consommation d’énergie finale dans le secteur du transport

Source : SDES, MTES

Champ : métropole, consommations réelles

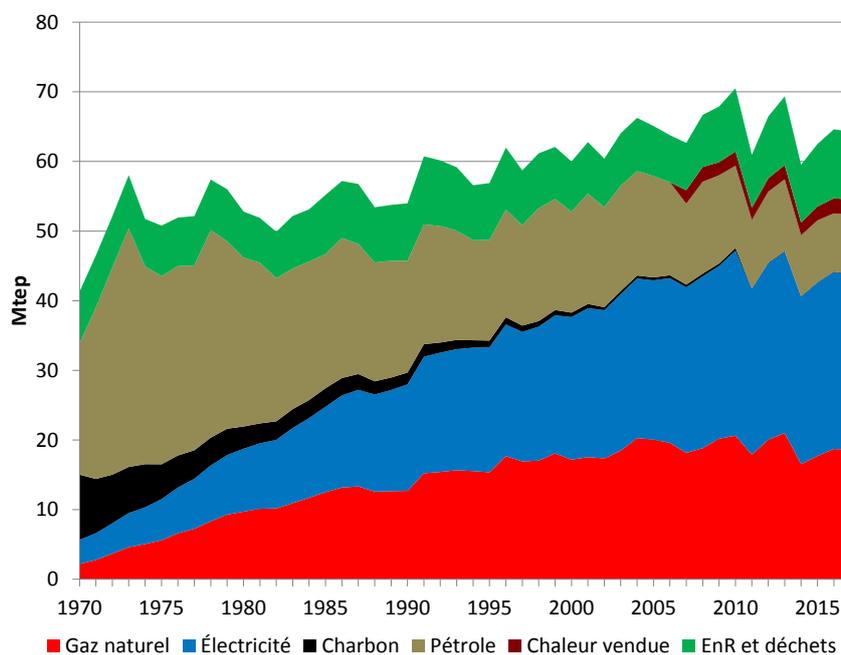


FIGURE D.3 – Consommation d’énergie finale dans les secteurs du résidentiel et tertiaire

Source : SDES, MTES

Champ : métropole, consommations réelles

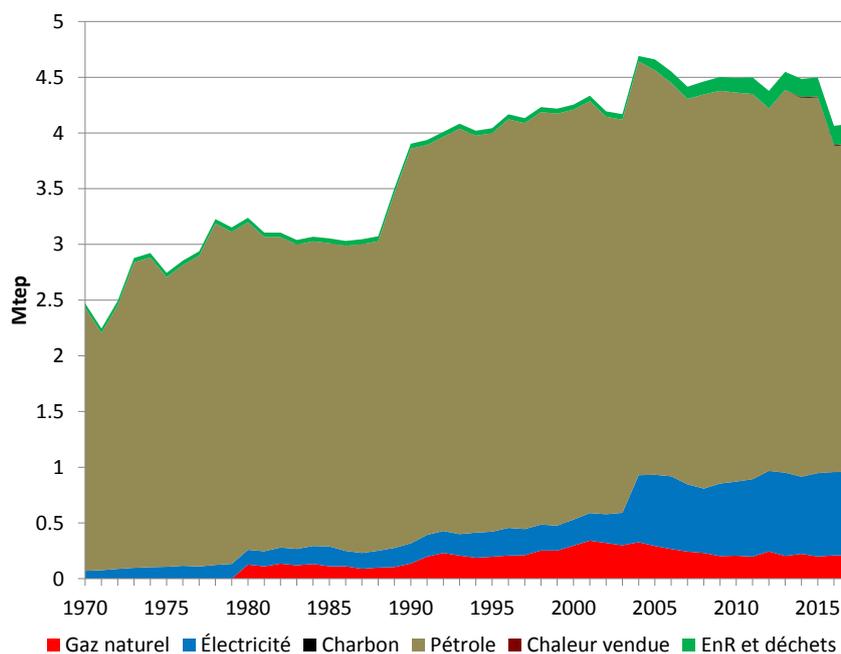


FIGURE D.4 – Consommation d'énergie finale dans le secteur de l'agriculture

Source : SDES, MTES

Champ : métropole, consommations réelles

## RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DU SCÉNARIO CENTRALV3\_SD

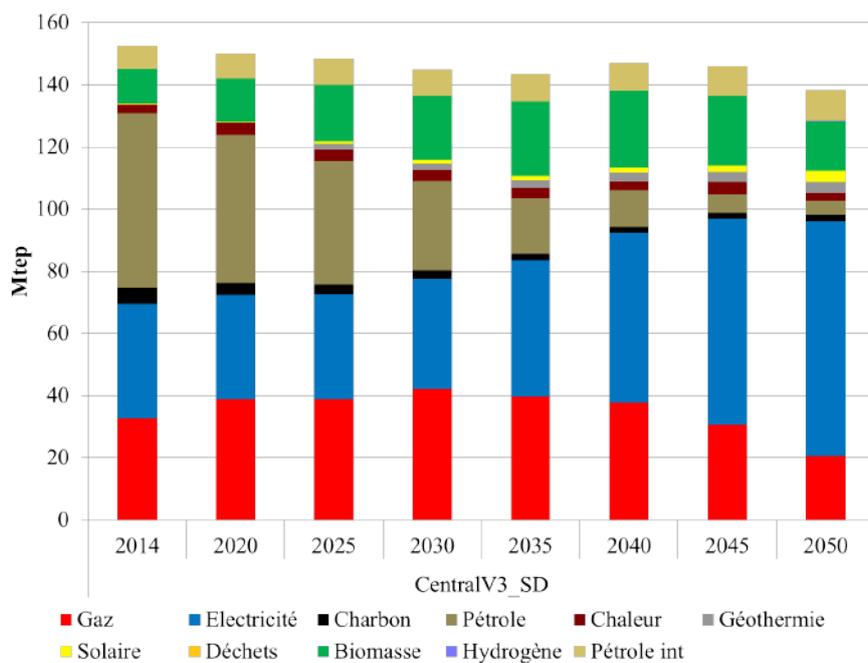


FIGURE E.1 – Consommation d'énergie finale totale dans CentralV3\_SD

Remarque : le gaz fait référence ici au vecteur gaz qui peut être composé de gaz naturel mais aussi de « gaz vert » (biométhane et hydrogène).

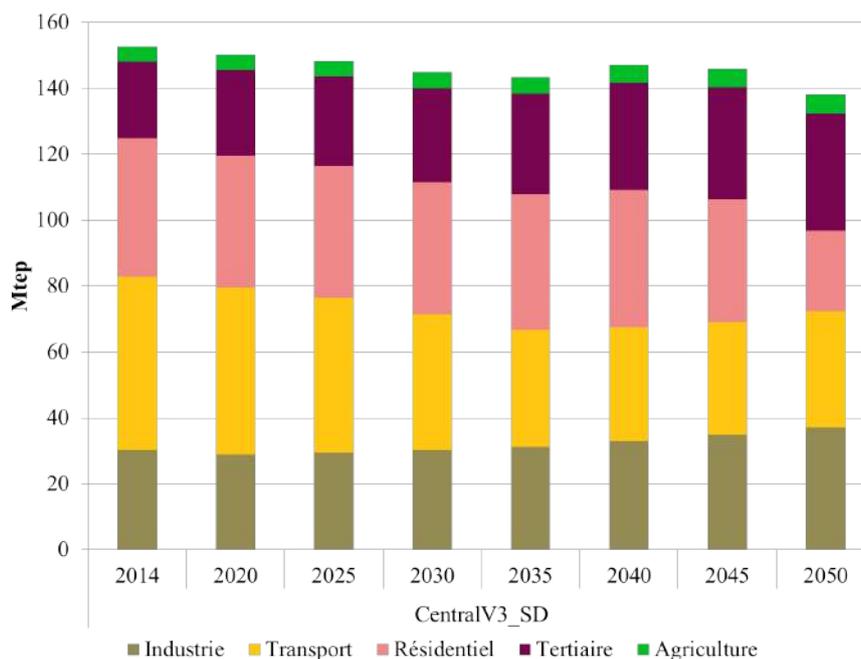
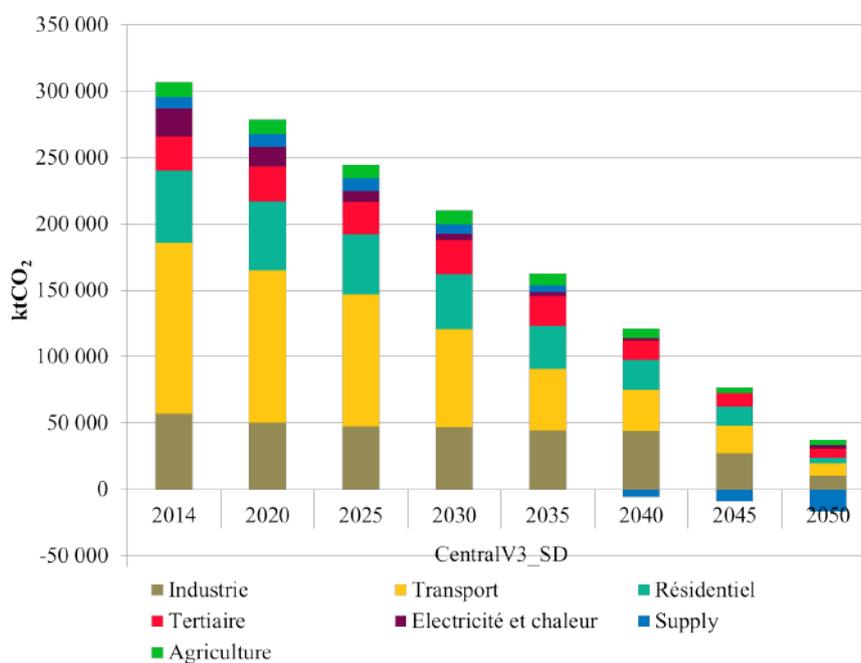


FIGURE E.2 – Consommation d'énergie finale sectorielle dans CentralV3\_SD

Remarque : la consommation d'énergie du transport comprend dans ce cas la consommation d'énergie liée aux secteurs internationaux (aviation et maritime).

FIGURE E.3 – Émissions CO<sub>2</sub> dans CentralV3\_SD

Remarque : les émissions CO<sub>2</sub> comprennent uniquement les émissions au périmètre national (excluant donc celles liées à l'aviation et au maritime international).

## RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DES SCÉNARIOS NEUTRALITÉS ET LTECV

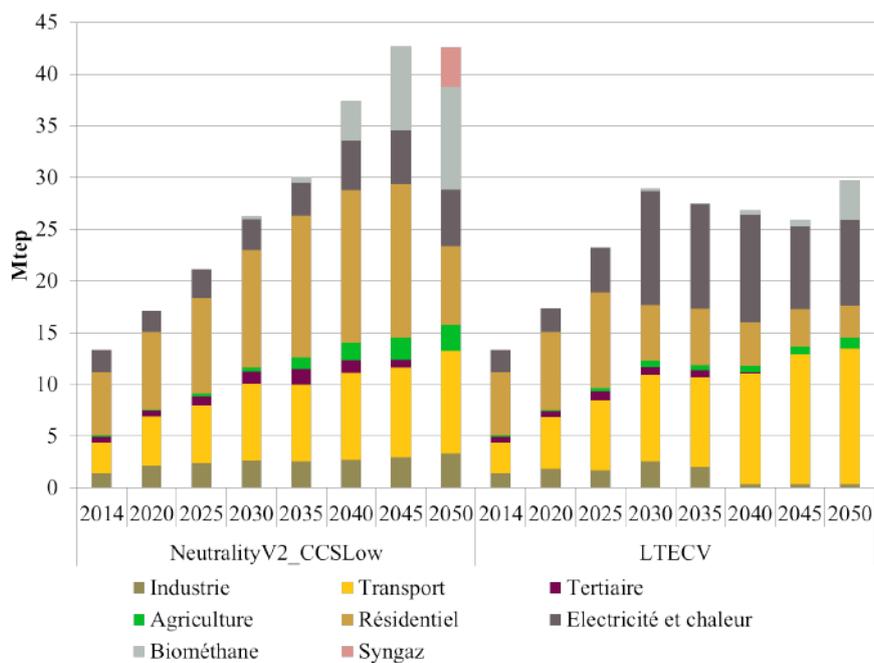


FIGURE F.1 – Utilisation de la biomasse dans NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

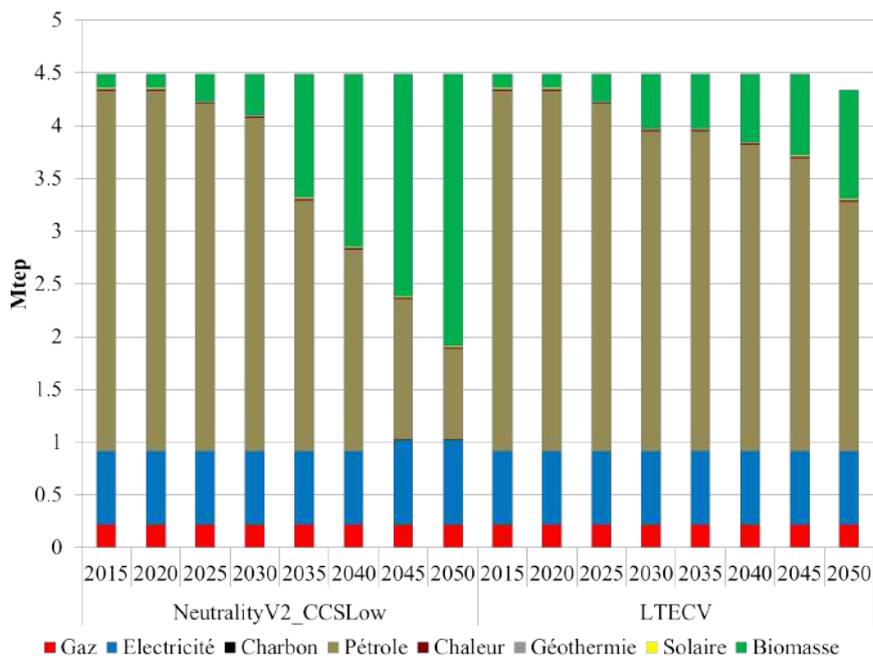


FIGURE F.2 – Consommation d’énergie finale dans l’agriculture dans NeutraLitV2\_CCSLow et LTECV

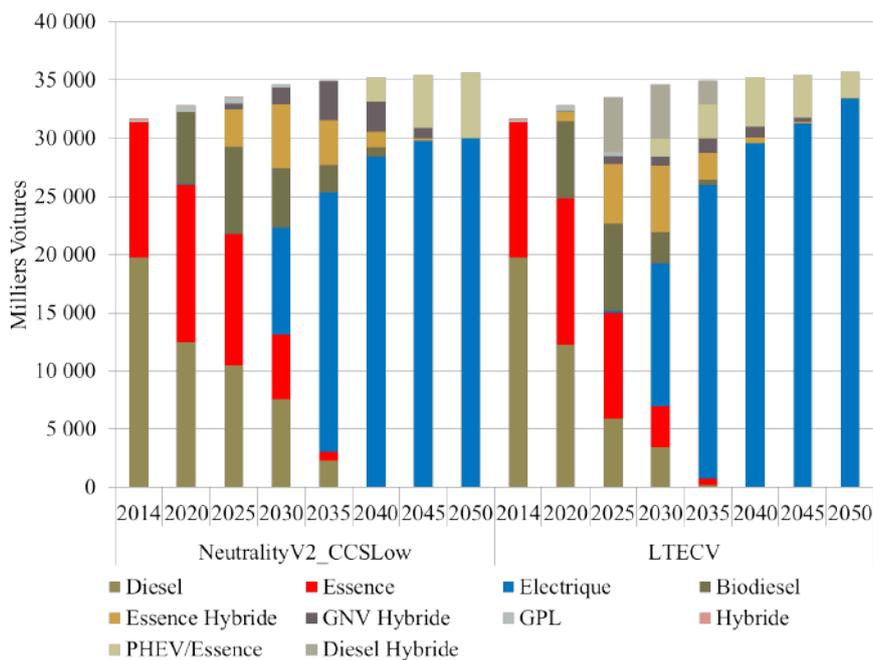


FIGURE F.3 – Évolution du parc de véhicules dans NeutraLitV2\_CCSLow et LTECV

Remarque : les véhicules diesel ou essence peuvent consommer du biocarburant.

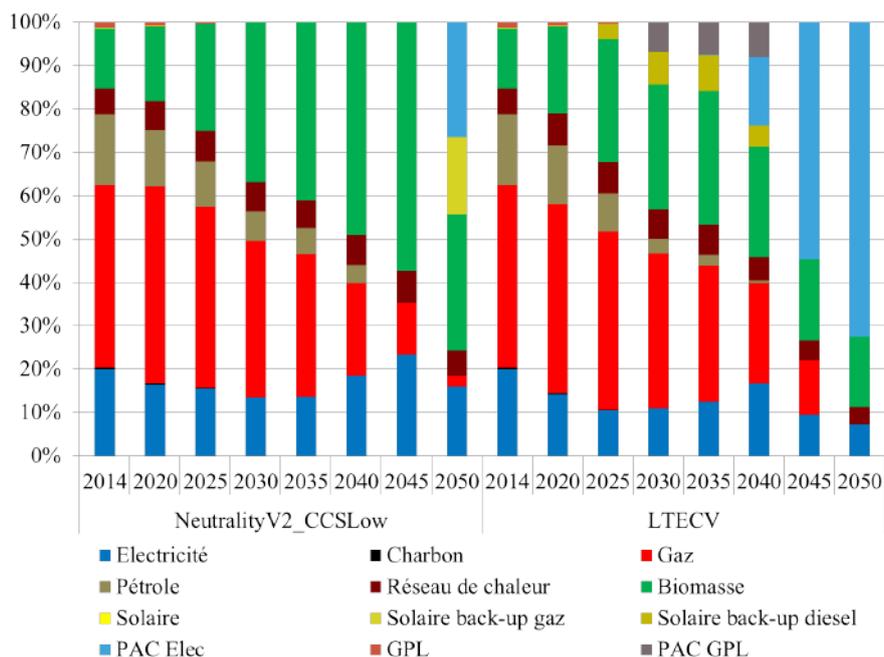


FIGURE F.4 – Technologies pour le chauffage et l’ECS dans le secteur résidentiel dans NeutralitV2\_CCSLow et LTECV

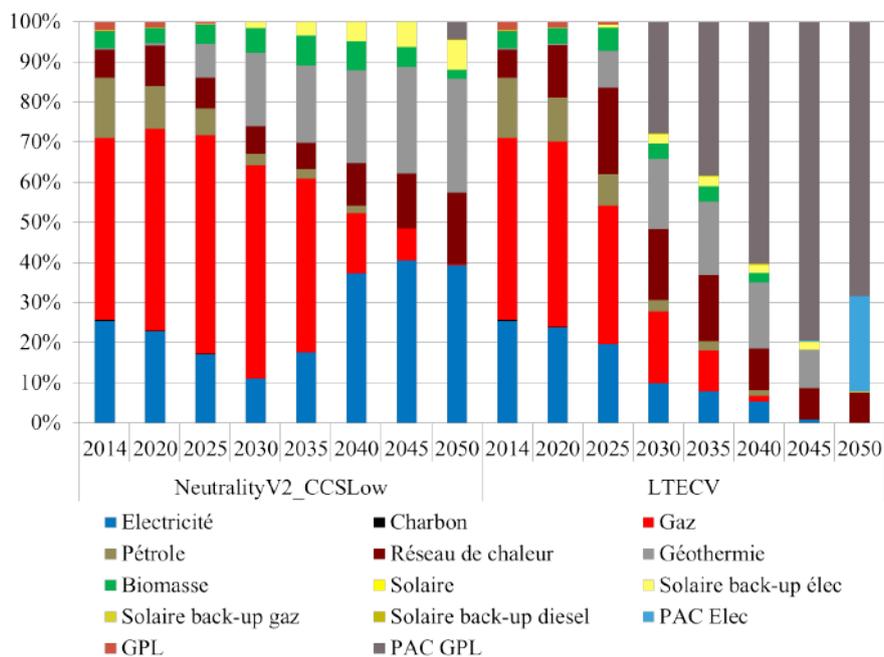


FIGURE F.5 – Technologies pour le chauffage et l’ECS dans le secteur tertiaire dans NeutralitV2\_CCSLow et LTECV

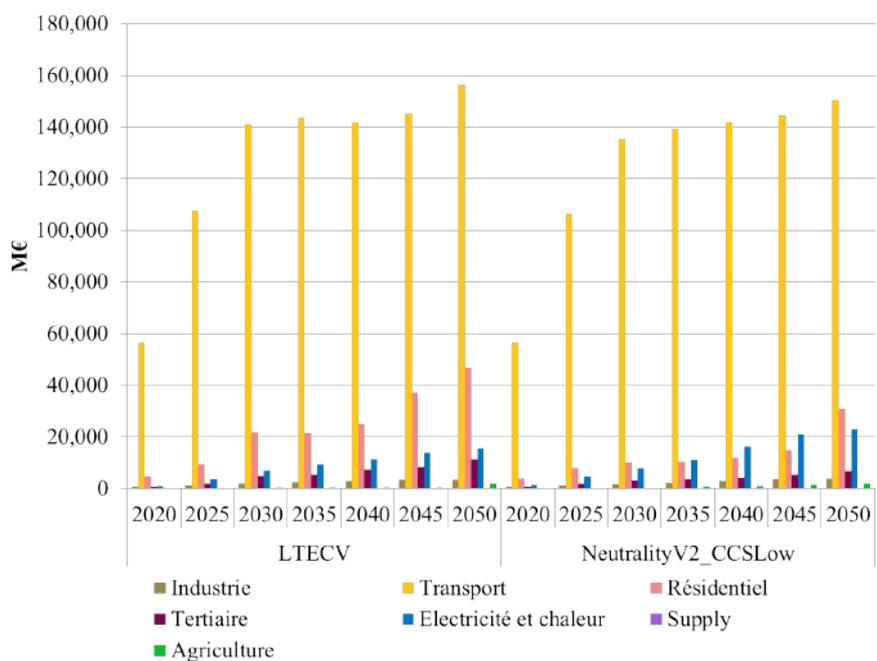


FIGURE F.6 – Investissements par secteur dans NeutralityV2\_CCSLow et LTECV

## RECHERCHE DE SOLUTIONS MULTIPLES POUR UN PROBLÈME D'OPTIMISATION LINÉAIRE

---

L'heuristique utilisée a été adaptée d'un code existant fourni par Gurobi<sup>1</sup>. Le principe est le suivant : on résout le problème d'optimisation pour obtenir une solution initiale. Les variables de cette solution dont les coûts réduits sont nuls sont fixées (puisqu'un coût réduit nul signifie que la variable est à son optimum). Les contraintes dont la valeur duale est non nulle sont transformées en contraintes d'égalité (puisque une valeur duale non nulle indique que la contrainte est saturée). On obtient donc un nouveau problème d'optimisation. Pour trouver de nouvelles solutions différentes des précédentes, on résout le nouveau problème d'optimisation en prenant une fonction objectif dont la direction est opposée à l'ensemble des autres solutions. On prend donc pour chaque coefficient de chaque variable, un barycentre des précédentes valeurs solutions. On obtient alors une nouvelle solution à notre problème d'optimisation. On répète cette opération jusqu'à ce que l'on retombe sur une solution déjà trouvée précédemment. La mise en œuvre de la méthode est présentée dans le [Listing G.1](#).

Listing G.1 – Heuristique pour trouver l'ensemble des solutions d'un problème d'optimisation

---

```
from gurobipy import *
import numpy as np

solfn = "alternate"
eps = 1e-4
numsols = 500 # max number of solutions to find

def find_all_optimal_sol(problem, objective):
    # Solve model to determine objective value
    model = problem.model
    variables = model.getVars()
    constraints = model.getConstrs()
    model.setObjective(objective, sense=GRB.MINIMIZE)
    model.optimize()
    if model.SolCount < 1:
        print('No solution found, stopping')
        exit(0)
    print('\nInitial solution has objective %f\n' % model.
          ObjVal)
    model.write(path + "%s%i.sol" % (solfn, 0))
```

---

1. Voir <https://groups.google.com/forum/#!topic/gurobi/BsJm4thVtFI>.

```

min_emi_0_values = {var: var.x for var in variables}
rows = get_constraints_rows(constraints, model, variables
    , min_emi_0_values, normalize=True)
constraints_coeffs = [linexpr_to_dict(row) for row in
    rows]
liste_allsol_constraint = [(min_emi_0_values,
    constraints_coeffs)]

# Initialize storage for previous solutions
prev_x = [model.getAttr('X', variables)]
# For LPs, fix variables with non-zero reduced costs and
    slacks with non-zero duals
rc = model.getAttr('RC', variables)
pi = model.getAttr('Pi', constraints)

original_bounds = {}
for i, var in enumerate(variables):
    if abs(rc[i]) > model.Params.OptimalityTol:
        original_bounds[var] = (var.lb, var.ub)
        var.lb = prev_x[0][i]
        var.ub = prev_x[0][i]

original_sense = {}
for i in range(len(constraints)):
    if abs(pi[i]) > model.Params.
        OptimalityTol:
        original_sense[constraints[i]] =
            constraints[i].sense
        constraints[i].sense = '='

# Initialize new objective
model.ModelSense = GRB.MINIMIZE
obj = list(prev_x[0]) # make a copy
for i in range(len(variables)):
    variables[i].obj = obj[i]

# Solve iteratively with different objectives
fail = 0
while len(prev_x) < numsols:
    model.optimize()
    this_x = model.getAttr('X', variables)
    # Test that the solution is new
    for k in range(len(prev_x)):
        new = False
        for i in range(len(variables)):
            if abs(this_x[i] - prev_x[k][i])
                > eps:
                new = True
                break
        if not new:
            break
    if not new:

```

```
print('\nSolution %i is same as solution
      %i, stopping\n' %
      (len(prev_x), k))
for i in range(len(variables)):
    obj[i] += 1*np.random.random()*
        abs(obj[i])
    variables[i].obj = obj[i]
fail += 1
if fail > 100:
    break
else:
    fail = 0
# Store and write current solution,
# modify objective and resolve
for i in range(len(variables)):
    obj[i] = 0.8 * this_x[i] + 0.2 *
        obj[i]
    variables[i].obj = obj[i]
print('\nAlternate solution %i found' %
      len(prev_x))
min_emi_modif = {var: var.x for var in
                 variables}
prev_x.append(this_x)
rows = get_constraints_rows(constraints,
                             model, variables, min_emi_modif,
                             original_sense, original_bounds,
                             normalize=True)
constraints_coefs = [linexpr_to_dict(row
) for row in rows]
liste_allsol_constraint.append((
    min_emi_modif, constraints_coefs))
return liste_allsol_constraint
```

---

## DESCRIPTION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ

Dans ce modèle simplifié se limitant au secteur électrique, on a trois variables associées à chaque technologie  $t$  et à chaque année  $y$  :

- $\text{prod}[t, y]$  : le niveau d'activité de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$  (c'est-à-dire la production associée à chaque technologie),
- $\text{capa}[t, y]$  : la capacité totale de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$ ,
- $\text{ncap}[t, y]$  : la nouvelle capacité de chaque technologie  $t$  à l'année  $y$ .

On note :

- $d$  : taux d'actualisation
- $\text{Fixcost}$  : coût fixe d'une technologie
- $\text{Invcost}$  : coût d'investissement d'une technologie
- $\text{Varcost}$  : coût variable d'une technologie
- $\text{Flexible}$  : l'ensemble des technologies permettant d'avoir une production flexible
- $\text{Seuil}_{\min}$  : seuil minimal que doit produire les technologies flexibles
- $\text{Demande}$  : la demande en énergie.

Le modèle d'optimisation est le suivant :

$$\min \sum_{t,y} (1+d)^{(y-y_0)} \left( \text{Fixcost}[t, y] \times \text{capa}[t, y] + \text{Invcost}[t, y] \times \text{ncap}[t, y] + \text{Varcost}[t, y] \times \text{prod}[t, y] \right) \quad (\text{H.1})$$

sous les contraintes :

1. de conservation des capacités : pour chaque technologie  $t$ ,  
 $\text{capa}[t, y] = \text{capa}[t, y-1] + \text{ncap}[t, y]$
2. d'installation maximale de nouvelles capacités :  
 $\text{ncap}[t, y] \leq \text{ncap}_{\max}[t, y]$
3. de capacité maximale :  $\text{capa}[t] \leq \text{capa}_{\max}[t]$
4. de production minimale par des moyens flexibles : pour chaque année  $y$ ,  
 $\sum_{t \in \text{Flexible}} \text{prod}[t, y] \geq \text{Seuil}_{\min} \sum_t \text{prod}[t, y]$
5. de production satisfaisant la demande : pour chaque année  $y$ ,  
 $\sum_t \text{prod}[t, y] \geq \text{Demande}[y]$

## MODÈLE SIMPLIFIÉ À 3 ANNÉES ET 3 TECHNOLOGIES

Le taux d'actualisation utilisé est de 4%. Les données des technologies sont présentées dans le [Tableau I.1](#). Le  $Seuil_{min}$  est fixé à 2%.

TABLE I.1 – Données des technologies utilisées et niveaux de demande pour le modèle à 3 technologies

PARAMÈTRE	nuclear	coal	hydro
Efficacité	0.33	0.33	100
Facteur d'émission (ktCO <sub>2</sub> /PJ)	0	98.3	0
<i>Flexible</i>	False	True	False
Capacité initiale (GW)	3	0.5	1
<i>Invcost</i> (€/kW)			
2019	6000	1000	3000
2020	5500	950	3000
2021	5000	900	3000
<i>capa<sub>max</sub></i> (GW)	12	9	4
<i>ncap<sub>max</sub></i> (GW)	1.5	3	1
<i>Fixcost</i> (€/kW)	100	30	50
<i>Varcost</i> (€/GJ)	2	6	0
<i>prod<sub>max</sub></i> (PJ/GW)	24	16	28

	2019	2020	2021
<i>Demande</i>	200	300	400

TABLE I.4 – Solution du BAU (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies)

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	56	104	144	3.5	6.5	9	3	3	2.5
hydro	56	84	112	2	3	4	1	1	1
nuclear	88	112	144	3.7	4.7	6	0.7	1	1.3

TABLE I.5 – Solution du min\_emi (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies)

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	36	72	108	2.2	4.5	6.8	1.8	2.2	2.2
hydro	56	84	112	2	3	4	1	1	1
nuclear	108	144	180	4.5	6	7.5	1.5	1.5	1.5

TABLE I.6 – Système de taxe pour transiter vers min\_emi (modèle simplifié à 3 années et 3 technologies) avec l'approche 1

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	10.5	10.5	66.5	0.7	0.7	4.2	0.7	0	3.5
hydro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	-10.5	-10.5	-66.5	-0.4	-0.4	-2.8	-0.4	0	-2.3

## MODÈLE SIMPLIFIÉ À 3 ANNÉES ET 6 TECHNOLOGIES

Le taux d'actualisation utilisé est de 4%. Les données des technologies sont présentées dans le [Tableau J.1](#). Le  $Seuil_{min}$  est fixé à 2%.

TABLE J.1 – Données des technologies utilisées et niveaux de demande pour le modèle à 6 technologies

PARAMÈTRE	nuclear	coal	hydro	gas	wind	solar
Efficacité	0.33	0.33	100	0.33	100	100
Facteur d'émission (ktCO <sub>2</sub> /PJ)	0	98.3	0	56.1	0	0
<i>Flexible</i>	False	True	False	True	False	False
Capacité initiale (GW)	3	0.5	1	0.5	1	1
<i>Invcost</i> (€/kW)	2019	6000	1000	3000	800	1500
	2020	5500	950	3000	750	1250
	2021	5000	900	3000	700	1000
<i>capa<sub>max</sub></i> (GW)	12	9	4	10	15	15
<i>ncap<sub>max</sub></i> (GW)	1.5	3	1	3	4	4
<i>Fixcost</i> (€/kW)	100	30	50	40	20	15
<i>Varcost</i> (€/GJ)	2	6	0	12	0	0
<i>prod<sub>max</sub></i> (PJ/GW)	24	16	28	24	8	5

	2019	2020	2021
<i>Demande</i>	300	400	500

TABLE J.4 – Solution du BAU (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies)

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	56	84	112	3.5	5.2	7	3	1.8	1.8
gas	84	156	228	3.5	6.5	9.5	3	3	3
hydro	56	56	56	2	2	2	1	0	0
nuclear	72	72	72	3	3	3	0	0	0
solar	5	5	5	1	1	1	0	0	0
wind	27	27	27	3.4	3.4	3.4	2.4	0	0

TABLE J.5 – Solution du min\_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies)

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0
gas	71	55	39	3	3	3	2.5	0	0
hydro	56	84	112	2	3	4	1	1	1
nuclear	108	144	180	4.5	6	7.5	1.5	1.5	1.5
solar	25	45	65	5	9	13	4	4	4
wind	40	72	104	5	9	13	4	4	4

TABLE J.6 – Système de taxe pour transiter vers min\_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) avec l'approche 1

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	39.7	24.4	105.8	0	0	0	0	0	0
gas	-2.8	18.9	100.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0
hydro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	-2.5	-79.3	0	-0.1	-3.3	0	-0.1	-3.2
solar	-36.9	-36.9	-123.2	-7.4	-7.4	-24.6	-7.4	0	-17.2
wind	0	-3.8	-3.8	0	-0.5	-0.5	0	-0.5	0

TABLE J.7 – Système de taxe pour transiter vers min\_emi (modèle simplifié à 3 années et 6 technologies) avec l’approche 2

Process	prod			capa			ncapa		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
coal	42.4	24.1	105.8	0	0	0	0	0	0
gas	0	18.5	100.5	0	0	0	0	0	0
hydro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	-2.9	-79.2	0	-0.1	-3.3	0	-0.1	-3.2
solar	-35.8	-35.8	-123.1	-7.2	-7.2	-24.6	-7.2	0	-17.5
wind	0	-4	-4	0	-0.5	-0.5	0	-0.5	0

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ABELSON, Philip H. (1980). « World Energy in Transition ». Dans : *Science* 210.4476, p. 1311-1311. ISSN : 0036-8075. URL : <https://www.jstor.org/stable/1686084> (visité le 03/10/2018) (Cité p. 10).
- ADEME (oct. 2012). *Chiffres-Clés Energie et Climat Edition 2012*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 283).
- (oct. 2013). *L'évaluation Macroéconomique Des Visions Énergétiques 2030-2050 de l'ADEME*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 66).
  - (oct. 2015). *Un Mix Électrique 100% Renouvelable ? Analyses et Optimisations*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 72).
  - (juin 2016). *Mix Électrique 100% Renouvelable à 2050 Evaluation Macro-Économique*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 66, 72).
  - (août 2017). *Actualisation Du Scénario Energie-Climat ADEME 2035-2050*. Horizons. Ademe Editions. ISBN : 979-10-297-0921-0 (Cité p. 141).
  - (nov. 2018a). *Chiffres-Clés Energie et Climat Edition 2018*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 116).
  - (oct. 2018b). *Trajectoires d'évolution Du Mix Électrique 2020-2060 Synthèse de l'étude*. Rapp. tech. ADEME (Cité p. 72).
  - (2019a). *Évolution du taux moyen d'émissions de CO2 en France*. URL : <http://carlabelling.ademe.fr/chiffrescles/r/evolutionTauxCo2> (visité le 01/07/2019) (Cité p. 109).
  - (2019b). *Répartition des ventes par carrosserie*. URL : <http://carlabelling.ademe.fr/chiffrescles/r/venteParTypeCarrosserie> (visité le 01/07/2019) (Cité p. 126).
- ADEME et BIO BY DELOITTE (mar. 2015). *Bilan National Du Recyclage 2003-2012*. Rapp. tech. (Cité p. 279).
- (2017). *Bilan national du recyclage 2005-2014 - Rapport final*. Rapp. tech., p. 105 (Cité p. 278).
- AFP (juin 2019). « Plus forte hausse des émissions de CO2 dans le monde en 7 ans ». Dans : *Connaissance des Énergies*. URL : <https://www.connaissancedesenergies.org/afp/plus-forte-hausse-des-emissions-de-co2-dans-le-monde-en-7-ans-190611> (visité le 27/06/2019) (Cité p. 67).
- AGRESTE (juin 2014). *Consommation et Production d'énergie Dans Les Exploitations Agricoles*. URL : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/environnement/consommation-et-production-d-959> (Cité p. 288).
- AIE (2011). *Technology Roadmap Carbon Capture and Storage in Industrial Applications*. Rapp. tech. Agence internationale de l'énergie (Cité p. 293).
- (2017). *World Energy Outlook 2017*. Paris : International Energy Agency, OECD Publishing. ISBN : 978-92-64-28230-8 (Cité p. 129, 148, 184).

- ALDY, Joseph et al. (nov. 2016). « Economic Tools to Promote Transparency and Comparability in the Paris Agreement ». Dans : *Nature Climate Change* 6.11, p. 1000-1004. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate3106](https://doi.org/10.1038/nclimate3106) (Cité p. 125).
- ALLEN, Robert C (2013). « Energy Transitions in History : The Shift to Coal ». Dans : *Energy Transitions in History : Global Cases of Continuity and Change*. Sous la dir. de Richard W. UNGER. RCC Perspectives. Munich : Rachel Carson Center for Environment and Society, p. 11-15 (Cité p. 44).
- (2009). *The British Industrial Revolution in Global Perspective*. 1<sup>re</sup> éd. New approaches to economic and social history. OCLC : 699757222. Cambridge : Cambridge Univ. Press. ISBN : 978-0-521-86827-3 978-0-521-68785-0 (Cité p. 42, 44, 45).
- (nov. 2012). « Backward into the Future : The Shift to Coal and Implications for the next Energy Transition ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 17-23. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.03.020](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.020) (Cité p. 44, 45, 53, 55).
- AMORCE (mar. 2016). *Comparatif Des Modes de Chauffage et Prix de Vente de La Chaleur. Données 2014*. Rapp. tech. AMORCE / ADEME. URL : <http://www.amorce.asso.fr/fr/espace-adherents/publications/rdc/prix-de-la-chaleur/comparatif-des-modes-de-chauffage-et-prix-de-vente-de-la-chaleur-rapport-2015-donnees-2014/> (Cité p. 74).
- ANDERSON, Kevin et Glen PETERS (oct. 2016). « The Trouble with Negative Emissions ». Dans : *Science* 354.6309, p. 182-183. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : [10.1126/science.aah4567](https://doi.org/10.1126/science.aah4567) (Cité p. 90).
- ANDERSSON, Kjell (2012). *Bioenergy - the Swedish Experience : How Bioenergy Became the Largest Energy Source in Sweden*. Sous la dir. de SVENSKA BIOENERGIFÖRENINGEN. OCLC : 939829618. Stockholm : SVEBIO. ISBN : 978-91-977624-4-1 (Cité p. 181).
- ANDRIOSOPOULOS, Kostas et Stephan SILVESTRE (juil. 2017). « French Energy Policy : A Gradual Transition ». Dans : *Energy Policy* 106, p. 376-381. ISSN : 03014215. DOI : [10.1016/j.enpol.2017.04.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.015) (Cité p. 81).
- ARAÚJO, Kathleen M. (2013). « Energy at the Frontier : Low Carbon Energy System Transitions and Innovation in Four Prime Mover Countries ». PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology (Cité p. 49, 50).
- ARAÚJO, Kathleen (mar. 2014). « The Emerging Field of Energy Transitions : Progress, Challenges, and Opportunities ». Dans : *Energy Research & Social Science* 1, p. 112-121. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2014.03.002](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.002) (Cité p. 34).
- ARDITI, Maryse, Robert DURDILLY, Richard LAVERGNE, Eléonore TRIGANO, Michel COLOMBIER et Patrick CRIQUI (2013). *Rapport Du Groupe de Travail 2 : Quelle Trajectoire Pour Atteindre Le Mix Énergétique En 2025 ? Quels Types de Scénarios Possibles à Horizons 2030 et 2050, Dans Le Respect Des Engagements Climatiques de La France ? Rapport Du Groupe de Travail Du Conseil National Sur La Transition Énergétique*. Débat national sur la transition énergétique (Cité p. 72, 84).

- ARENSEN, Maarten, René KEMP et Esther LUITEN (2002). « Chapter 4 Technological Change and Innovation for Climate Protection : The Governance Challenge ». Dans : *Global Warming and Social Innovation : The Challenge of a Climate-Neutral Society*. Sous la dir. de Marcel T. J. KOK. OCLC : 845529728. London : Earthscan, p. 59-82. ISBN : 978-1-85383-945-0 978-1-85383-944-3 (Cité p. 25, 27).
- ARNOUX, Mathieu (fév. 2015a). « 200 000 ans de transition énergétique ». Dans : *L'Histoire* 408, p. 8-15. URL : <http://www.lhistoire.fr/200-000-ans-de-transition-%5C%C3%A9nerg%5C%C3%A9tique> (Cité p. 36, 61).
- (déc. 2015b). « Les transitions énergétiques d’hier ». Dans : *Alternatives Economiques* 352. URL : <https://www.alternatives-economiques.fr/transitions-energetiques-dhier/00010949> (visité le 17/05/2019) (Cité p. 38).
- ASSOCIATION NÉGAWATT (oct. 2011). *Scénario négaWatt 2011 - Dossier de Synthèse*. Rapp. tech. Association négaWatt. URL : <http://www.negawatt.org> (Cité p. 13).
- ASSOUMOU, Edi (2006). « Modélisation MARKAL Pour La Planification Énergétique Long Terme Dans Le Contexte Français ». Thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris (Cité p. 184, 272, 275).
- ASSOUMOU, Edi et Nadia MAÏZI (juil. 2011). « Carbon Value Dynamics for France : A Key Driver to Support Mitigation Pledges at Country Scale ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Renewable energy policy and development 39.7, p. 4325-4336. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2011.04.050 (Cité p. 268).
- ATTIGA, Ali Ahmed (1979). « Global Energy Transition and the Third World ». Dans : *Third World Quarterly* 1.4, p. 39-56. ISSN : 0143-6597. URL : <https://www.jstor.org/stable/3990396> (visité le 03/10/2018) (Cité p. 10).
- AUDET, René (juin 2014). « The Double Hermeneutic of Sustainability Transitions ». Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 11, p. 46-49. ISSN : 2210-4224. DOI : 10.1016/j.eist.2014.02.001 (Cité p. 209).
- (2015). « Le champ des sustainability transitions : origines, analyses et pratiques de recherche ». Dans : *Cahiers de recherche sociologique* 58, p. 73-93. ISSN : 0831-1048, 1923-5771. DOI : 10.7202/1036207ar (Cité p. 12, 16, 22, 25, 26, 205, 206, 208, 209).
- AYKUT, Stefan (2015). « Energy Futures from the Social Market Economy to the Energiewende : The Politicization of West German Energy Debates, 1950-1990 ». Dans : *The Struggle for the Long-Term in Transnational Science and Politics : Forging the Future*. Sous la dir. de Jenny ANDERSSON et Eglė RINDZEVICIŪTĖ. Routledge approaches to history 11. New York : Routledge, Taylor & Francis Group, p. 63-91. ISBN : 978-1-138-85853-4 (Cité p. 12).
- AYKUT, Stefan C. et Amy DAHAN (2011). « Le régime climatique avant et après Copenhague : sciences, politiques et l’objectif des deux degrés » ». Dans : *Natures Sciences Societes* Vol. 19.2, p. 144-157. ISSN : 1240-1307. URL : <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2011-2-page-144.htm?contenu=resume> (Cité p. 19).

- AYKUT, Stefan C. et Aurélien EVRARD (2017). « Une transition pour que rien ne change ? Changement institutionnel et dépendance au sentier dans les « transitions énergétiques » en Allemagne et en France ». Dans : *Revue internationale de politique comparée* 24.1, p. 17-49. ISSN : 1370-0731. DOI : [10.3917/ripc.241.0017](https://doi.org/10.3917/ripc.241.0017) (Cité p. 12, 13, 17, 57, 81, 120).
- AYKUT, Stefan C., Aurélien EVRARD et Sezin TOPÇU (2017). « Au-delà du consensus : l'impératif de la « transition énergétique » à l'épreuve du regard comparatif ». Dans : *Revue internationale de politique comparée* 24.1, p. 7-15. ISSN : 1370-0731. DOI : [10.3917/ripc.241.0007](https://doi.org/10.3917/ripc.241.0007) (Cité p. 16, 17, 65).
- AYKUT, Stefan Cihan (oct. 2017). « La « Gouvernance Incantatoire ». L'accord de Paris et Les Nouvelles Formes de Gouvernance Globale ». Dans : *La pensée écologique. Points de vue* 1.1. URL : <http://lapenseeecologique.com/la-gouvernance-incantatoire-laccord-de-paris-et-les-nouvelles-formes-de-gouvernance-globale/> (visité le 10/11/2017) (Cité p. 3).
- AYKUT, Stefan Cihan et Amy DAHAN (2014a). « Chap 3. Le protocole de Kyoto et la grammaire du marché ». Dans : *Gouverner le climat ?* Références. OCLC : 900414136. Paris : Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.), p. 325-398. ISBN : 978-2-7246-1680-4 (Cité p. 20).
- (2014b). *Gouverner le climat ?* Références. OCLC : 900414136. Paris : Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.) ISBN : 978-2-7246-1680-4 (Cité p. 4, 12, 19, 79).
- BAK, Per, Chao TANG et Kurt WIESENFELD (juil. 1987). « Self-Organized Criticality : An Explanation of the 1/f Noise ». Dans : *Physical Review Letters* 59.4, p. 381-384. DOI : [10.1103/PhysRevLett.59.381](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.381) (Cité p. 212).
- BALL, Philip (déc. 2004). « The Physical Modelling of Human Social Systems ». Dans : *Complexus* 1.4, p. 190-206. ISSN : 1424-8492, 1424-8506. DOI : [10.1159/000082449](https://doi.org/10.1159/000082449) (Cité p. 212).
- BARANZINI, Andrea, José GOLDEMBERG et Stefan SPECK (mar. 2000). « A Future for Carbon Taxes ». Dans : *Ecological Economics* 32.3, p. 395-412. ISSN : 09218009. DOI : [10.1016/S0921-8009\(99\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00122-6) (Cité p. 137).
- BARNOSKY, Anthony D. et al. (juin 2012). « Approaching a State Shift in Earth's Biosphere ». Dans : *Nature* 486.7401, p. 52-58. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/nature11018](https://doi.org/10.1038/nature11018) (Cité p. 212).
- BARRÉ, Rémi, Thierry LAVOUX et Vincent PIVETEAU (2015a). « Chap. 4 Quarante ans au service des politiques de l'environnement ». Dans : *Un demi-siècle d'environnement entre science, politique et prospective. En l'honneur de Jacques Theys*. Indisciplines. Versailles : Editions Quæ, p. 63-78. ISBN : 978-2-7592-2302-2 (Cité p. 76, 77, 80, 81, 91, 119, 120, 121).
- (2015b). « Chap. 5 Le développement durable : une parenthèse ? » Dans : *Un demi-siècle d'environnement entre science, politique et prospective En l'honneur de Jacques Theys*. Indisciplines. Versailles : Editions Quæ, p. 79-100. ISBN : 978-2-7592-2302-2 (Cité p. 16, 97).
- BASHMAKOV, Igor (juil. 2007). « Three Laws of Energy Transitions ». Dans : *Energy Policy* 35.7, p. 3583-3594. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2006.12.023](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.023) (Cité p. 51).
- BAUMOL, William J. (1972). « On Taxation and the Control of Externalities ». Dans : *The American Economic Review* 62.3, p. 307-322. ISSN : 0002-8282.

- URL : <https://www.jstor.org/stable/1803378> (visité le 15/04/2019)  
(Cité p. 124).
- BÉAL, Vincent (2016). « La Modernisation  cologique : Quelle Théorie Pour Quel Changement Social ? » Dans : *Guide Des Humanités Environnementales*. Sous la dir. d'Aurélie CHON , Isabelle HAJEK et Philippe HAMMAN. Environnement et société. Villeneuve d'Ascq, France : Presses universitaires du Septentrion, p. 223-234. ISBN : 978-2-7574-1150-6 (Cité p. 120).
- BECK, Ulrich, Wolfgang BONSS et Christoph LAU (avr. 2003). « The Theory of Reflexive Modernization : Problematic, Hypotheses and Research Programme ». Dans : *Theory, Culture & Society* 20.2, p. 1-33. ISSN : 0263-2764. DOI : [10.1177/0263276403020002001](https://doi.org/10.1177/0263276403020002001) (Cité p. 21).
- BELTRAN, Michel (avr. 2015). *La France et Sa Politique de l' nergie (Années 1970/Années 2010)*. Maison Heinrich Heine, Paris (Cité p. 71, 76).
- BENNETT, Simon J (nov. 2012). « Using Past Transitions to Inform Scenarios for the Future of Renewable Raw Materials in the UK ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 95-108. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.03.073](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.073) (Cité p. 22).
- BEPM (juil. 2015a). *Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air de référence pour la France à l'horizon 2035 Rapport final - Section 1 - Présentation des mesures et hypothèses*. Rapp. tech. MEDDE DGEC, p. 221 (Cité p. 142, 279).
- (sept. 2015b). *Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air Pour La France à l'horizon 2035 Rapport Final - Synthèse Des Résultats*. Rapp. tech. MEDDE DGEC (Cité p. 88, 141).
- BERGER, Gaston (1964). *Phénoménologie du temps et prospective*. Presses univ. de France (Cité p. 198).
- BERGH, Andreas et Gissur   ERLINGSSON (mar. 2009). « Liberalization without Retrenchment : Understanding the Consensus on Swedish Welfare State Reforms ». Dans : *Scandinavian Political Studies* 32.1, p. 71-93. ISSN : 1467-9477. DOI : [10.1111/j.1467-9477.2008.00210.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9477.2008.00210.x) (Cité p. 182).
- BERGQUIST, Ann-Kristin et Kristina SÖDERHOLM (oct. 2016). « Sustainable Energy Transition : The Case of the Swedish Pulp and Paper Industry 1973–1990 ». Dans : *Energy Efficiency* 9.5, p. 1179-1192. ISSN : 1570-646X, 1570-6478. DOI : [10.1007/s12053-015-9416-5](https://doi.org/10.1007/s12053-015-9416-5) (Cité p. 182).
- BIRKHOFF, George D. (d c. 1931). « Proof of the Ergodic Theorem ». Dans : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 17.12, p. 656-660. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : [10.1073/pnas.17.2.656](https://doi.org/10.1073/pnas.17.2.656) (Cité p. 239).
- BJÖRHEDEN, Rolf (avr. 2006). « Drivers behind the Development of Forest Energy in Sweden ». Dans : *Biomass and Bioenergy*. Proceedings of the third annual workshop of Task 31 'Sustainable production systems for bioenergy : Impacts on forest resources and utilization of wood for energy' October 2003, Flagstaff, Arizona, USA 30.4, p. 289-295. ISSN : 0961-9534. DOI : [10.1016/j.biombioe.2005.07.005](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.07.005) (Cité p. 180, 181).
- BLOCH, Marc (1935). « Av nement et Conqu te Du Moulin   Eau ». Dans : *Annales d'histoire économique et sociale* 7.36, p. 538-563 (Cité p. 34).

- BOCCARD, Nicolas (mar. 2014). « The Cost of Nuclear Electricity : France after Fukushima ». Dans : *Energy Policy* 66, p. 450-461. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2013.11.037](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.037) (Cité p. 70).
- BOISSIEU, Christian de (2006). *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*. Rapp. tech. Paris : Mission interministérielle de l'effet de serre, Ministère de l'économie des finances et de l'industrie (Cité p. 13).
- BOISSONADE, Léa (juin 2017). *La Transition Analyse d'un Concept*. Rapp. tech. CGDD (Commissariat général au développement durable) (Cité p. 21).
- BOITEUX, Marcel (juin 2001). *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*. Rapp. tech. Commissariat général du Plan, p. 323 (Cité p. 127).
- BONNEUIL, Christophe et Jean-Baptiste FRESSOZ (oct. 2013). *L'Événement Anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*. Seuil. ISBN : 978-2-02-113504-6 (Cité p. 10, 38).
- BORNHOLDT, Stefan et Friedrich WAGNER (déc. 2002). « Stability of Money : Phase Transitions in an Ising Economy ». Dans : *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications* 316.1, p. 453-468. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/S0378-4371\(02\)01218-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01218-9) (Cité p. 212).
- BOSMAN, Rick, Derk LOORBACH, Niki FRANTZESKAKI et Till PISTORIUS (déc. 2014). « Discursive Regime Dynamics in the Dutch Energy Transition ». Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 13, p. 45-59. ISSN : 2210-4224. DOI : [10.1016/j.eist.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.eist.2014.07.003) (Cité p. 22, 27).
- BOSMAN, Rick et Jan ROTMANS (oct. 2016). « Transition Governance towards a Bioeconomy : A Comparison of Finland and The Netherlands ». Dans : *Sustainability* 8.10, p. 1017. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su8101017](https://doi.org/10.3390/su8101017) (Cité p. 204).
- BOULANGER, Paul-Marie (nov. 2008). « Une Gouvernance Du Changement Sociétal : Le Transition Management ». Dans : *La revue nouvelle* 11.1, p. 61-73. URL : <http://tbauler.pbworks.com/w/file/fetch/79227509/Transition%5C%20Management%5C%20-%5C%20PMB%5C%20français.pdf> (visité le 14/06/2016) (Cité p. 22, 25, 200, 202, 204, 207, 208, 209).
- BOURDU, Émilie (2013). *Les transformations du modèle économique suédois*. La Fabrique de l'industrie. OCLC : 852242559. Paris : Presses des Mines. ISBN : 978-2-35671-048-2 (Cité p. 173, 181).
- BOURG, Dominique et Lucile SCHMID (jan. 2018). « Les limites de la planète ». Dans : *Esprit* Janvier-Février.1, p. 169-178. ISSN : 0014-0759. DOI : [10.3917/espri.1801.0169](https://doi.org/10.3917/espri.1801.0169) (Cité p. 16).
- BOURGOIS, Bernard (déc. 2015). « La décentralisation énergétique en France dans les décennies 1980-2000 : les mutations des enjeux et des marchés énergétiques ». Dans : *Encyclopédie de l'énergie*. URL : <https://www.encyclopedie-energie.org/la-decentralisation-energetique-en-france-dans-les-decennies-1980-2000-les-mutations-des-enjeux-et-des-marches-energetiques/> (visité le 05/02/2019) (Cité p. 75).
- BOYCE, James K. (août 2018). « Carbon Pricing : Effectiveness and Equity ». Dans : *Ecological Economics* 150, p. 52-61. ISSN : 0921-8009. DOI : [10.1016/j.ecolecon.2018.03.030](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.030) (Cité p. 125).

- BRILLOUIN, Léon (1956). *Science and Information Theory*. OCLC : 458714256. New York : Academic Press (Cité p. 214).
- BRIMBLECOMBE, Peter (juil. 2012). *The Big Smoke (Routledge Revivals) : A History of Air Pollution in London since Medieval Times*. Routledge. ISBN : 978-1-136-70329-4 (Cité p. 42).
- BROMLEY, Peter Sircom (déc. 2016). « Extraordinary Interventions : Toward a Framework for Rapid Transition and Deep Emission Reductions in the Energy Space ». Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 165-171. ISSN : 2214-6296. DOI : 10.1016/j.erss.2016.08.018 (Cité p. 52).
- BROWN, Calum, Peter ALEXANDER, Almut ARNETH, Ian HOLMAN et Mark ROUNSEVELL (fév. 2019). « Achievement of Paris Climate Goals Unlikely Due to Time Lags in the Land System ». Dans : *Nature Climate Change*, p. 1. ISSN : 1758-6798. DOI : 10.1038/s41558-019-0400-5 (Cité p. 3).
- BRUCKNER, Thomas, Igor Alexeyevich BASHMAKOV et Yacob MULUGETTA (2014). « Energy Systems ». Dans : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chan.* Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press (Cité p. 15).
- BRUNDTLAND, Gru et al. (mai 1987). *Our Common Future ('Brundtland Report')*. World Commission on Environment and Development. New-York, USA : Oxford University Press. ISBN : 978-0-19-282080-8 (Cité p. 10, 11).
- BRUNETIÈRE, Jean-René, Sylvie ALEXANDRE, Marc D'AUBREBY, Georges DEBIESE, André-Jean GUÉRIN, Bernard PERRET et Dominique SCHWARTZ (fév. 2013). *Le Facteur 4 En France : La Division Par 4 Des Émissions de Gaz à Effet de Serre à l'horizon 2050*. Rapp. tech. n°-008378-01. CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable) (Cité p. 93).
- BUTTEL, F. H. (fév. 2000). « Ecological Modernization as Social Theory ». Dans : *Geoforum* 31.1, p. 57-65. ISSN : 0016-7185. DOI : 10.1016/S0016-7185(99)00044-5 (Cité p. 21).
- CANFIN, Pascal (sept. 2016). « La Transition Énergétique Mondiale Est En Marche ». Dans : *AlterEco+ Alterecoplus*. URL : <http://www.alterecoplus.fr/pascal-canfin/la-transition-energetique-mondiale-est-en-marche/00012151> (visité le 31/10/2016) (Cité p. 14).
- CARTER, Neil et Michael JACOBS (mar. 2014). « Explaining Radical Policy Change : The Case of Climate Change and Energy Policy Under the British Labour Government 2006–10 ». Dans : *Public Administration* 92.1, p. 125-141. ISSN : 1467-9299. DOI : 10.1111/padm.12046 (Cité p. 99).
- CASSITTO, Lorenzo (déc. 1990). « District Heating Systems in Europe. A Review ». Dans : *Resources, Conservation and Recycling* 4.4, p. 271-281. ISSN : 0921-3449. DOI : 10.1016/0921-3449(90)90010-2 (Cité p. 74).
- CAYLA, Jean-Michel (mar. 2011). « Les ménages sous la contrainte carbone : exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES ». Thèse de doct. École Nationale Supérieure des Mines de Paris (Cité p. 137).

- CAYLA, Jean-Michel et Nadia MAÏZI (fév. 2015). « Integrating Household Behavior and Heterogeneity into the TIMES-Households Model ». Dans : *Applied Energy* 139, p. 56-67. ISSN : 0306-2619. DOI : [10.1016/j.apenergy.2014.11.015](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.015) (Cité p. 268).
- CCC, Committee on Climate Change (jan. 2018). *An Independent Assessment of the UK's Clean Growth Strategy*. Rapp. tech. London : Committee on Climate Change (Cité p. 103).
- (mai 2019). *Net Zero The UK's Contribution to Stopping Global Warming*. Rapp. tech. London : Committee on Climate Change (Cité p. 103).
- CCFA (2015). *Analyse et Statistiques 2015 L'industrie Automobile Française*. Rapp. tech. Comité des Constructeurs Français d'Automobiles. URL : <https://ccfa.fr/publications/analyse-statistiques/edition-2015/> (Cité p. 280).
- CEREMA (juil. 2012). *Historique du développement des réseaux de chaleur en France - Réseaux de chaleur et territoires*. URL : <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/historique-du-developpement-des-reseaux-de-chaleur-en-france> (visité le 08/09/2018) (Cité p. 74).
- (déc. 2016). *Les réseaux de chaleur en France - Réseaux de chaleur et territoires*. URL : <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/les-reseaux-de-chaleur-en-france> (visité le 13/09/2018) (Cité p. 74).
- CEREN (2018a). *Données Énergie 1990-2016 Du Secteur Résidentiel*. URL : <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/> (Cité p. 78, 109, 283).
- (2018b). *Données Énergie 1990-2016 Du Secteur Tertiaire*. URL : <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/> (Cité p. 109, 285).
- CETE (juil. 2016). *Aviis Du Comité d'experts Pour La Transition Énergétique Sur La Programmation Pluriannuelle de l'énergie (PPE)*. Rapp. tech. (Cité p. 97, 98).
- CGDD, (Commissariat général au développement durable) (juil. 2015). « Les comptes des transports en 2014 Tome 1 52e rapport à la Commission des comptes des transports de la Nation ». Dans : *Références*, p. 178 (Cité p. 279).
- CGDD et Manuel BAUDE (avr. 2018). *L'empreinte Carbone*. Document de Travail 38. La Défense : CGDD (Commissariat général au développement durable), Service de la données et des études statistiques. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-01/document-travail-n%5C%2038-empreinte%5C%20carbone-avril-2018.pdf> (Cité p. 117).
- CHABOT, Pascal (2015). *L'âge des transitions*. 1. éd. OCLC : 910374897. Paris : PUF. ISBN : 978-2-13-063073-9 (Cité p. 9, 14).
- CHASSERIAUX, Jean-Michel (1983). « La politique énergétique française ». Dans : *Revue d'économie industrielle* 23.1, p. 268-276. ISSN : 0154-3229. DOI : [10.3406/rei.1983.1163](https://doi.org/10.3406/rei.1983.1163) (Cité p. 77).

- CHAVANCE, Bernard (1990). « Quelle transition vers quelle économie de marché pour les pays de l'Est? » Dans : *Revue française d'économie* 5.4, p. 83-104. DOI : [10.3406/rfec.1990.1265](https://doi.org/10.3406/rfec.1990.1265) (Cité p. 14).
- CHENERY, H. (juin 1981). *Restructuring the World Economy : Round II*. Rapp. tech. REP204. The World Bank, p. 1-21. URL : <http://documents.worldbank.org/curated/en/916551467980463732/Restructuring-the-world-economy-round-II> (visité le 04/06/2018) (Cité p. 10).
- CHERP, Aleh, Vadim VINICHENKO, Jessica JEWELL, Masahiro SUZUKI et Miklós ANTAL (fév. 2017). « Comparing Electricity Transitions : A Historical Analysis of Nuclear, Wind and Solar Power in Germany and Japan ». Dans : *Energy Policy* 101, p. 612-628. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2016.10.044](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.044) (Cité p. 173).
- CHERUBINI, Francesco, Glen P. PETERS, Terje BERNTSEN, Anders H. STRØMMAN et Edgar HERTWICH (2011). « CO<sub>2</sub> Emissions from Biomass Combustion for Bioenergy : Atmospheric Decay and Contribution to Global Warming ». Dans : *GCB Bioenergy* 3.5, p. 413-426. ISSN : 1757-1707. DOI : [10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x) (Cité p. 15).
- COASE, R. H. (1960). « The Problem of Social Cost ». Dans : *The Journal of Law & Economics* 3, p. 1-44. ISSN : 0022-2186. URL : <https://www.jstor.org/stable/724810> (visité le 04/07/2019) (Cité p. 124).
- COLLECTIF (sept. 2018). « « Le plus grand défi de l'histoire de l'humanité » : l'appel de 200 personnalités pour sauver la planète ». Dans : *Le Monde*. ISSN : 1950-6244. URL : [https://www.lemonde.fr/idees/article/2018/09/03/le-plus-grand-defi-de-l-histoire-de-l-humanite-l-appel-de-200-personnalites-pour-sauver-la-planete\\_5349380\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2018/09/03/le-plus-grand-defi-de-l-histoire-de-l-humanite-l-appel-de-200-personnalites-pour-sauver-la-planete_5349380_3232.html) (visité le 09/10/2018) (Cité p. 17).
- COMMISSION DES COMPTES DES TRANSPORTS DE LA NATION (août 2018). *Les Comptes Des Transports En 2017*. Rapport de La Commission Des Comptes Des Transports de La Nation 55. Commission des comptes des transports de la Nation. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-42-rapport-comptes-transports-2017-aout2018.pdf> (visité le 02/07/2019) (Cité p. 91).
- COUR DES COMPTES (déc. 2013). *La Mise En Oeuvre Par La France Du Paquet Energie-Climat*. Rapp. tech. Cour des Comptes (Cité p. 117).
- (jan. 2014). *Synthèse La mise en oeuvre par la France du Paquet énergie-climat*. Rapp. tech. Cour des Comptes, p. 29 (Cité p. 120).
  - (2016). *Rapport Annuel 2016 - Tome 1 - Deuxième Partie - Chapitre II : La Maintenance Des Centrales Nucléaires : Une Politique Remise à Niveau , Des Incertitudes à Lever*. Rapp. tech. Cour des Comptes. URL : <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/04-maintenance-centrales-nucleaires-RPA2016-Tome-1.pdf> (Cité p. 150).
  - (mar. 2018). *Le Soutien Aux Énergies Renouvelables*. Rapp. tech. (Cité p. 99).
- COURT, Victor (déc. 2018). « A Reassessment of the Great Divergence Debate : Towards an Analytical Framework Reconciling the Interaction of Apparently Distinct Determinants ». Dans : *Working Paper Chair Energy & Prosperity* (Cité p. 47).

- CRAMTON, Peter, Axel OCKENFELS et Jean TIROLE (jan. 2017). « Policy Brief—Translating the Collective Climate Goal Into a Common Climate Commitment ». Dans : *Review of Environmental Economics and Policy* 11.1, p. 165-171. ISSN : 1750-6816. DOI : [10.1093/reep/rew015](https://doi.org/10.1093/reep/rew015) (Cité p. 124).
- CRASSOUS, Renaud (nov. 2008). « Modéliser Le Long Terme Dans Un Monde de Second Rang : Application Aux Politiques Climatiques ». Thèse de doct. CIRED (Cité p. 137).
- CRUIQU, Patrick, Sandrine MATHY et Jean-Charles HOURCADE (sept. 2015). *Pathways to Deep Decarbonization in France*. Rapp. tech. SDSN - IDDRI, p. 60 (Cité p. 141).
- CRUCIANI, Michel (juin 2016). *La Transition Énergétique En Suède*. Etudes de l'Ifri. Ifri. ISBN : 978-2-36567-585-7 (Cité p. 173).
- CURIE, Pierre (1895). « Propriétés Magnétiques Des Corps à Diverses Températures ». Dans : *Ann. Chem. et Phys.* 5, p. 289-405 (Cité p. 10, 211, 217).
- DAHAN, Amy (jan. 2018). « La climatisation du monde ». Dans : *Esprit* Janvier-Février.1, p. 75-86. ISSN : 0014-0759. DOI : [10.3917/espri.1801.0075](https://doi.org/10.3917/espri.1801.0075) (Cité p. 16).
- DANGERMAN, A. T. C. Jérôme et Hans Joachim SCHELLNHUBER (déc. 2013). « Energy Systems Transformation ». Dans : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.7, E549-E558. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : [10.1073/pnas.1219791110](https://doi.org/10.1073/pnas.1219791110) (Cité p. 213).
- DARBY, Megan (juin 2017). « Sweden Passes Climate Law to Become Carbon Neutral by 2045 ». Dans : *Climate Home - climate change news*. URL : <http://www.climatechangenews.com/2017/06/15/sweden-passes-climate-law-become-carbon-neutral-2045/> (visité le 24/09/2017) (Cité p. 61, 141).
- DE FONTAINE, Didier (jan. 1979). « Configurational Thermodynamics of Solid Solutions ». Dans : *Solid State Physics*. Sous la dir. d'Henry EHRENREICH, Frederick SEITZ et David TURNBULL. T. 34. Academic Press, p. 73-274. DOI : [10.1016/S0081-1947\(08\)60360-4](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60360-4) (Cité p. 217).
- DE LUMLEY, Henry (jan. 2006). « Il y a 400 000 Ans : La Domestication Du Feu, Un Formidable Moteur d'hominisation ». Dans : *Comptes Rendus Palevol* 5.1, p. 149-154. ISSN : 1631-0683. DOI : [10.1016/j.crpv.2005.11.014](https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.11.014) (Cité p. 36).
- DE MEYER, Thibault (oct. 2015). « Pascal Chabot, L'âge des transitions ». Dans : *Lectures*. ISSN : 2116-5289. URL : <https://lectures.revues.org/19253> (visité le 19/10/2017) (Cité p. 15).
- DE PERTHUIS, Christian (fév. 2017). « La transition énergétique : un concept à géométrie variable ». Dans : *L'Encyclopédie de l'énergie*, p. 13. URL : <https://www.encyclopedie-energie.org/la-transition-energetique-un-concept-a-geometrie-variable/> (Cité p. 14, 31).
- DE PERTHUIS, Christian et Boris SOLIER (juil. 2018). « La Transition Énergétique Face Au Temp de l'horloge Climatique ». Dans : *Informations et Débats*. Chaire Economie du Climat 56 (Cité p. 18).

- DEBEIR, Jean-Claude, Jean-Paul DELÉAGE et Daniel HÉMERY (mar. 2013). *Une histoire de l'énergie : les servitudes de la puissance*. Paris : Flammarion. ISBN : 978-2-08-129361-8 (Cité p. 18, 70).
- DEBIZET, Gilles, Antoine TABOURDEAU, Caroline GAUTHIER et Philippe MENANTEAU (oct. 2016). « Spatial Processes in Urban Energy Transitions : Considering an Assemblage of Socio-Energetic Nodes ». Dans : *Journal of Cleaner Production*. Special Volume : Transitions to Sustainable Consumption and Production in Cities 134, p. 330-341. ISSN : 0959-6526. DOI : [10.1016/j.jclepro.2016.02.140](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.140) (Cité p. 22).
- DGEC (juil. 2015). *Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air de Référence Pour La France à l'horizon 2035 Rapport Final - Section 1 - Présentation Des Mesures et Hypothèses*. Rapp. tech. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (Cité p. 89).
- (mar. 2019). *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*. Rapp. tech. Direction Générale de l'Énergie et du Climat, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, p. 47 (Cité p. 88, 90, 91, 92, 141, 149).
- DI LUCIA, Lorenzo et Karin ERICSSON (déc. 2014). « Low-Carbon District Heating in Sweden – Examining a Successful Energy Transition ». Dans : *Energy Research & Social Science* 4, p. 10-20. ISSN : 22146296. DOI : [10.1016/j.erss.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.08.005) (Cité p. 181).
- DOBRUSCHIN, R.L. (jan. 1968). « The Description of a Random Field by Means of Conditional Probabilities and Conditions of Its Regularity ». Dans : *Theory of Probability & Its Applications* 13.2, p. 197-224. ISSN : 0040-585X. DOI : [10.1137/1113026](https://doi.org/10.1137/1113026) (Cité p. 239).
- DOBRUSHIN, R. L. (oct. 1968). « The Problem of Uniqueness of a Gibbsian Random Field and the Problem of Phase Transitions ». Dans : *Functional Analysis and Its Applications* 2.4, p. 302-312. ISSN : 0016-2663, 1573-8485. DOI : [10.1007/BF01075682](https://doi.org/10.1007/BF01075682) (Cité p. 239).
- (1969). « Gibbsian Random Fields for Lattice Systems with Pairwise Interactions ». Dans : *Functional Analysis and Its Applications* 2.4, p. 292-301. ISSN : 0016-2663, 1573-8485. DOI : [10.1007/BF01075681](https://doi.org/10.1007/BF01075681) (Cité p. 239).
- DOMB, Cyril, Melville S. GREEN et Joel Louis LEBOWITZ (1972 –2001). *Phase Transitions and Critical Phenomena Vol. 1-20*. Editors : v. 1-6 (1972-76) by C. Domb and M.S. Green ; v. 7-20 (1983-2001) by C. Domb and J.L. Lebowitz. OCLC : 926870361. London : Academic Press (Cité p. 211).
- DOUARD, Pascal, Jean-Michel NATAF, Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT (fév. 2017). *Actualisation Des Analyses Sectorielles Du Rapport Du CGEDD N° 008378-01 de Février 2013 Relatif à La Division Par 4 Des Émissions de Gaz à Effet de Serre à l'horizon 2050*. Rapp. tech. 008378-02. CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable) (Cité p. 117, 273).
- DOUDARD, Rémy (2018). « Flexibilité et Interactions de Long Terme Dans Les Systèmes Multi-Énergies : Analyse Technico-Économique Des Nouvelles Filières Gazières et Électriques En France ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (Cité p. 292).

- ÉCOIFFIER, Matthieu (déc. 2017). *Une Analyse de La Baisse Des Émissions de CO<sub>2</sub> Dues à La Combustion d'énergie En France Depuis 1990*. Rapp. tech. INSEE (Cité p. 115, 116).
- EDENHOFER, Ottmar, Jan Christoph STECKEL, Michael JAKOB et Christoph BERTRAM (2018). « Reports of Coal's Terminal Decline May Be Exaggerated ». Dans : *Environmental Research Letters* 13.2, p. 024019. ISSN : 1748-9326. DOI : [10.1088/1748-9326/aaa3a2](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa3a2) (Cité p. 3).
- EHRENFEST, Paul (1933). « Phasenumwandlungen Im Ueblichen Und Erweiterten Sinn, Classifiziert Nach Den Entsprechenden Singularitaeten Des Thermodynamischen Potentiales ». Dans : *Proceedings Royal Acad, Amsterdam*. 36, p. 153-157 (Cité p. 217).
- ENTHOVEN, Raphaël, Jacques PERRY-SALKOW et Jianghong CHEN (2016). *Anagrammes pour lire dans les pensées*. OCLC : 962084718. Arles : Actes sud. ISBN : 978-2-330-06307-8 (Cité p. 2, 33, 262).
- ERICSSON, Karin, Suvi HUTTUNEN, Lars J. NILSSON et Per SVENNINGSSON (oct. 2004). « Bioenergy Policy and Market Development in Finland and Sweden ». Dans : *Energy Policy* 32.15, p. 1707-1721. ISSN : 03014215. DOI : [10.1016/S0301-4215\(03\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00161-7) (Cité p. 181).
- ERICSSON, Karin et Sven WERNER (nov. 2016). « The Introduction and Expansion of Biomass Use in Swedish District Heating Systems ». Dans : *Biomass and Bioenergy* 94, p. 57-65. ISSN : 0961-9534. DOI : [10.1016/j.biombioe.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.011) (Cité p. 181).
- ERNST, L., R.E. DE GRAAF-VAN DINTHER, G.J. PEEK et D.A. LOORBACH (jan. 2016). « Sustainable Urban Transformation and Sustainability Transitions; Conceptual Framework and Case Study ». Dans : *Journal of Cleaner Production* 112, p. 2988-2999. ISSN : 09596526. DOI : [10.1016/j.jclepro.2015.10.136](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.136) (Cité p. 22).
- EURACTIV.FR et AFP (nov. 2017). « La Baisse à 50% Du Nucléaire Repoussée, Colère Contre Hulot ». Dans : *EURACTIV.fr*. URL : <http://www.euractiv.fr/section/energie/news/la-baisse-a-50-du-nucleaire-repousse-colere-contre-hulot/> (visité le 08/11/2017) (Cité p. 72).
- EUROSTAT (2014). *Energy Statistics*. URL : <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/energy/data/database> (Cité p. 275).
- (2018). *Energy Statistics*. URL : <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/energy/data/database> (Cité p. 175).
- EVANS, Simon (juin 2019). « In-Depth Q&A : The UK Becomes First Major Economy to Set Net-Zero Climate Goal ». Dans : *Carbon Brief*. URL : <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-uk-becomes-first-major-economy-to-set-net-zero-climate-goal> (visité le 15/06/2019) (Cité p. 61, 103, 141).
- EVARD, Aurélien (mai 2014). *Définir la transition énergétique, décrypter un « consensus ambigu » Une comparaison franco-allemande*. Montréal (Cité p. 14, 120).
- FANKHAUSER, Sam, Alina AVERCHENKOVA et Jared FINNEGAN (avr. 2018). *10 Years of the UK Climate Change Act*. Rapp. tech. Grantham Research Institute

- on Climate Change, Environment and the Centre for Climate Change Economics and Policy, p. 43 (Cité p. 101).
- FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY (juin 2018). *Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende*. Rapp. tech. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, p. 194 (Cité p. 103).
- (juin 2019). *Zweiter Fortschrittsberichts Zur Energiewende Berichtsjahr 2017*. Rapp. tech. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, p. 194 (Cité p. 103).
- FEYDEL, Sandrine et Christophe BONNEUIL (2015). *Prédation : nature, le nouvel eldorado de la finance*. Cahier libres. OCLC : 910834173. Paris : Découverte. ISBN : 978-2-7071-8585-3 (Cité p. 20).
- FINON, Dominique (1996). « French Energy Policy : The Effectiveness and Limitations of Colbertism ». Dans : *European Energy Policies in a Changing Environment*. Sous la dir. de Francis MCGOWAN. Energy Economics and Policy. Heidelberg : Physica-Verlag HD, p. 21-56. ISBN : 978-3-642-61492-7. DOI : [10.1007/978-3-642-61492-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61492-7_2). URL : [https://doi.org/10.1007/978-3-642-61492-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61492-7_2) (visité le 19/02/2019) (Cité p. 70, 75, 76, 78, 117, 118).
- FINON, Dominique et Carine STAROPOLI (août 2001). « Institutional and Technological Co-Evolution in the French Electronuclear Industry ». Dans : *Industry and Innovation* 8.2, p. 179-199. ISSN : 1366-2716. DOI : [10.1080/13662710120072967](https://doi.org/10.1080/13662710120072967) (Cité p. 70).
- FLINN M.A, Michael W. (juin 1959). « Timber and the Advance of Technology : A Reconsideration ». Dans : *Annals of Science* 15.2, p. 109-120. ISSN : 0003-3790. DOI : [10.1080/00033795900200108](https://doi.org/10.1080/00033795900200108) (Cité p. 34).
- FOUQUET, Roger (nov. 2010). « The Slow Search for Solutions : Lessons from Historical Energy Transitions by Sector and Service ». Dans : *Energy Policy*. Energy Efficiency Policies and Strategies with regular papers. 38.11, p. 6586-6596. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2010.06.029](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.029) (Cité p. 47, 51, 53, 54, 55, 56, 59, 60, 61, 65, 66).
- (nov. 2012). « The Demand for Environmental Quality in Driving Transitions to Low-Polluting Energy Sources ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 138-149. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.04.068](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.068) (Cité p. 65, 66, 173).
  - (déc. 2016a). « Historical Energy Transitions : Speed, Prices and System Transformation ». Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 7-12. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.08.014](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.014) (Cité p. 37, 54, 55, 56, 60, 63).
  - (déc. 2016b). « Lessons from Energy History for Climate Policy : Technological Change, Demand and Economic Development ». Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 79-93. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.09.001](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.09.001) (Cité p. 51, 66).
  - (août 2016c). « Path Dependence in Energy Systems and Economic Development ». Dans : *Nature Energy* 1.8. ISSN : 2058-7546. DOI : [10.1038/nenergy.2016.98](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.98) (Cité p. 60).

- FOUQUET, Roger et Peter J. G. PEARSON (nov. 2012). « Past and Prospective Energy Transitions : Insights from History ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 1-7. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.08.014](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.014) (Cité p. 18, 53, 58, 59, 60).
- FOYER, Jean (2015). « Introduction : La modernisation écologique à l'épreuve de Rio+20 ». Dans : *Regards croisés sur Rio+20. La modernisation écologique à l'épreuve*. Sous la dir. de Jean FOYER. CNRS éditions, p. 11-28. ISBN : 978-2-271-08649-5. URL : <http://journals.openedition.org/lectures/18956> (visité le 15/11/2018) (Cité p. 12).
- FRANCE (août 2015). *LOI N° 2015-992 Du 17 Août 2015 Relative à La Transition Énergétique Pour La Croissance Verte*. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385%5C&categorieLien=id> (visité le 01/02/2018) (Cité p. 83).
- FRESSOZ, Jean-Baptiste (fév. 2014). « Pour Une Histoire Désorientée de l'énergie ». Dans : *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie Verte En Question*. Sous la dir. de Daniel THEVENOT. T. JSE-2014. Journées Scientifiques de l'Environnement. Créteil, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956441> (visité le 08/01/2019) (Cité p. 16, 37, 56, 64).
- (oct. 2018). « L'expression "transition énergétique" est source de confusion ». Dans : *Le Monde.fr*. URL : [https://www.lemonde.fr/idees/article/2018/10/23/jean-baptiste-fressoz-l-expression-transition-energetique-est-source-de-confusion\\_5373130\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2018/10/23/jean-baptiste-fressoz-l-expression-transition-energetique-est-source-de-confusion_5373130_3232.html) (visité le 08/01/2019) (Cité p. 64).
- GALES, Ben (2013). « A Dutch Revolution : Natural Gas in the Netherlands ». Dans : *Energy Transitions in History : Global Cases of Continuity and Change*. Sous la dir. de Richard W. UNGER. RCC Perspectives. Munich : Rachel Carson Center for Environment and Society, p. 83-90 (Cité p. 49).
- GALES, Ben, Astrid KANDER, Paolo MALANIMA et Mar RUBIO (août 2007). « North versus South : Energy Transition and Energy Intensity in Europe over 200 Years ». Dans : *European Review of Economic History* null.02, p. 219-253. ISSN : 1474-0044. DOI : [10.1017/S1361491607001967](https://doi.org/10.1017/S1361491607001967) (Cité p. 57, 63, 180).
- GALLIC, Thomas Le, Edi ASSOUMOU, Nadia MAÏZI et Pierre STROSSER (déc. 2014). « Les exercices de prospective énergétique à l'épreuve des mutations des modes de vie ». Dans : *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 14.3. ISSN : 1492-8442. DOI : [10.4000/vertigo.15635](https://doi.org/10.4000/vertigo.15635) (Cité p. 88).
- GARRETT, A.J.M. (1991). « Macroirreversibility and Microreversibility Reconciled : The Second Law ». Dans : *Maximum Entropy in Action*. Sous la dir. de B. BUCK et V.A. MACAULAY. Oxford, UK : Oxford University Press, p. 139-170 (Cité p. 215).
- GARRIC, Audrey (sept. 2019). « Jusqu'à + 7 °C en 2100 : les experts français du climat aggravent leurs projections sur le réchauffement ». Dans : *Le Monde.fr*. URL : <https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/09/17/jusqu-a-7-c-en-2100-les-experts-francais-du-climat-aggravent->

- leurs-projections-sur-le-rechauffement\_5511336\_3244.html (visité le 27/09/2019) (Cité p. 3).
- GEDEN, Oliver (déc. 2015). « Paris Climate Deal : The Trouble with Targetism ». Dans : *The Guardian*. ISSN : 0261-3077. URL : <https://www.theguardian.com/science/political-science/2015/dec/14/the-trouble-with-targetism> (visité le 16/06/2016) (Cité p. 19, 118).
- (mai 2016). « An Actionable Climate Target ». Dans : *Nature Geoscience* 9.5, p. 340-342. ISSN : 1752-0894. DOI : [10.1038/ngeo2699](https://doi.org/10.1038/ngeo2699) (Cité p. 19).
- GEELS, F. W. (déc. 2002). « Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes : A Multi-Level Perspective and a Case-Study ». Dans : *Research Policy* 31.8-9, p. 1257-1274. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8) (Cité p. 24, 66).
- GEELS, F. W., A. McMEEKIN et B. PFLUGER (avr. 2018). « Socio-Technical Scenarios as a Methodological Tool to Explore Social and Political Feasibility in Low-Carbon Transitions : Bridging Computer Models and the Multi-Level Perspective in UK Electricity Generation (2010–2050) ». Dans : *Technological Forecasting and Social Change*. ISSN : 0040-1625. DOI : [10.1016/j.techfore.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.001) (Cité p. 29).
- GEELS, Frank, Benjamin SOVACOOOL, Tim SCHWANEN et Steve SORRELL (sept. 2017). « Sociotechnical Transitions for Deep Decarbonization ». Dans : *Science* 357, p. 1242-1244. DOI : [10.1126/science.aao3760](https://doi.org/10.1126/science.aao3760) (Cité p. 204).
- GEELS, Frank W. (2005). « The Dynamics of Transitions in Socio-Technical Systems : A Multi-Level Analysis of the Transition Pathway from Horse-Drawn Carriages to Automobiles (1860–1930) ». Dans : *Technology Analysis & Strategic Management* 17.4, p. 445-476. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537320500357319> (visité le 06/06/2016) (Cité p. 22, 27).
- (sept. 2006). « The Hygienic Transition from Cesspools to Sewer Systems (1840–1930) : The Dynamics of Regime Transformation ». Dans : *Research Policy* 35.7, p. 1069-1082. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/j.respol.2006.06.001](https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.06.001) (Cité p. 64, 265).
- (juin 2011). « The Multi-Level Perspective on Sustainability Transitions : Responses to Seven Criticisms ». Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1.1, p. 24-40. ISSN : 2210-4224. DOI : [10.1016/j.eist.2011.02.002](https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002) (Cité p. 205).
- (sept. 2014). « Regime Resistance against Low-Carbon Transitions : Introducing Politics and Power into the Multi-Level Perspective ». Dans : *Theory, Culture & Society* 31.5, p. 21-40. ISSN : 0263-2764, 1460-3616. DOI : [10.1177/0263276414531627](https://doi.org/10.1177/0263276414531627) (Cité p. 60, 205).
- GEELS, Frank W., Frans BERKHOUT et Detlef P. VAN VUUREN (mai 2016). « Bridging Analytical Approaches for Low-Carbon Transitions ». Dans : *Nature Climate Change* 6.6, p. 576-583. ISSN : 1758-678X, 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate2980](https://doi.org/10.1038/nclimate2980) (Cité p. 29).
- GEELS, Frank W., Florian KERN, Gerhard FUCHS, Nele HINDERER, Gregor KUNGL, Josephine MYLAN, Mario NEUKIRCH et Sandra WASSERMANN (mai 2016). « The Enactment of Socio-Technical Transition Pathways : A Reformulated Typology and a Comparative Multi-Level Analysis of the German

- and UK Low-Carbon Electricity Transitions (1990–2014) ». Dans : *Research Policy* 45.4, p. 896-913. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/j.respol.2016.01.015](https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.01.015) (Cité p. 27, 173).
- GEELS, Frank W. et Johan SCHOT (avr. 2007). « Typology of Sociotechnical Transition Pathways ». Dans : *Research Policy* 36.3, p. 399-417. ISSN : 00487333. DOI : [10.1016/j.respol.2007.01.003](https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003) (Cité p. 21, 24, 25, 26, 27, 28, 69, 119, 206).
- GENG, Jiang-Bo, Qiang JI et Ying FAN (sept. 2016). « The Impact of the North American Shale Gas Revolution on Regional Natural Gas Markets : Evidence from the Regime-Switching Model ». Dans : *Energy Policy* 96, p. 167-178. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.047) (Cité p. 50).
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas (fév. 1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press. ISBN : 978-0-674-28164-6 (Cité p. 213).
- GIRAUDET, Louis-Gaëtan, Céline GUIVARCH et Philippe QUIRION (2011). « Comparing and Combining Energy Saving Policies : Will Proposed Residential Sector Policies Meet French Official Targets ? » Dans : *The Energy Journal* 32, p. 213-242. ISSN : 0195-6574. URL : <https://www.jstor.org/stable/41323316> (visité le 02/07/2019) (Cité p. 126).
- GIRAUDET, Louis-Gaëtan, Céline GUIVARCH, Philippe QUIRION et Lucile PENOT-ANTONIOU (nov. 2011). *Evaluation Des Mesures Du Grenelle de l'Environnement Sur Le Parc de Logements*. Rapp. tech. 58. Paris : CGDD Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, CIRED (Cité p. 126).
- GLORIAN, Stéphane (oct. 2018). « Une Évaluation Quantifiée de La "Taxe Carbone" Française ». Dans : *Informations et Débats*. Chaire Economie du Climat 57 (Cité p. 127).
- GODARD, Olivier (mai 2016). « Quel Bilan Pour La COP 21 ? » Dans : *Les cahiers français* 392, p. 87-91 (Cité p. 3).
- GOULDER, Lawrence H. (août 1995). « Environmental Taxation and the Double Dividend : A Reader's Guide ». Dans : *International Tax and Public Finance* 2.2, p. 157-183. ISSN : 1573-6970. DOI : [10.1007/BF00877495](https://doi.org/10.1007/BF00877495) (Cité p. 137).
- GRANDJEAN, Alain, Emmanuel BLANCHET, Esther FINIDORI et CARBONE 4 (fév. 2014). *Etude Des 4 Trajectoires Du DNTE*. Rapp. tech. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (Cité p. 83).
- GRIN, John, Francisca FELIX, Bram BOS et Sierk SPOELSTRA (2004). « Practices for Reflexive Design : Lessons from a Dutch Programme on Sustainable Agriculture ». Dans : *International Journal of Foresight and Innovation Policy* 1.1-2, p. 126-149. URL : <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJFIP.2004.004618> (visité le 06/06/2016) (Cité p. 205).
- GRUBLER, Arnulf (oct. 2009a). *An Assessment of the Costs of the French Nuclear PWR Program 1970–2000*. Rapp. tech. IR-09-036. International Institute for Applied Systems Analysis, p. 36 (Cité p. 70).
- (2009b). « Energy Transitions ». Dans : *Concise encyclopedia of history of energy*. URL : <http://www.digitaluniverse.net/energytransitions/view/article/152561/> (visité le 21/12/2016) (Cité p. 51, 56, 60).

- GRUBLER, Arnulf (sept. 2010). « The Costs of the French Nuclear Scale-up : A Case of Negative Learning by Doing ». Dans : *Energy Policy*. Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers 38.9, p. 5174-5188. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2010.05.003](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003) (Cité p. 70).
- (nov. 2012). « Energy Transitions Research : Insights and Cautionary Tales ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 8-16. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.02.070](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.070) (Cité p. 53, 54, 55, 60, 63).
- GRUBLER, Arnulf, Nebojsa NAKICENOVIC, Shonali PACHAURI, Hans-Holger ROGNER et Kirk R. SMITH (2014). « Energy Primer ». Dans : *Global Energy Assessment*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis, pp. 1-118 (Cité p. 55).
- GRUBLER, Arnulf, Nebojša NAKIĆENOVIĆ et David G VICTOR (mai 1999). « Dynamics of Energy Technologies and Global Change ». Dans : *Energy Policy* 27.5, p. 247-280. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/S0301-4215\(98\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(98)00067-6) (Cité p. 55).
- GRUBLER, Arnulf, Charlie WILSON et Gregory NEMET (déc. 2016). « Apples, Oranges, and Consistent Comparisons of the Temporal Dynamics of Energy Transitions ». Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 18-25. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.08.015](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.015) (Cité p. 18, 52, 56, 60).
- GUERRY, Anaïs (2016). « A Reflection on Some Legal Aspects of Decision Control in the Energy Transition Process : A Comparison of France and Germany ». Dans : *Energy, Governance and Sustainability*. Sous la dir. de Jordi JARIA I MANZANO, Nathalie J. CHALIFOUR et Louis J. KOTZÉ. The IUCN Academy of Environmental Law series. OCLC : ocn936144938 cites : guerry\_reflection\_2016. Cheltenham, UK ; Northampton, MA : Edward Elgar Publishing, p. 194-218. ISBN : 978-1-78536-811-0 (Cité p. 12).
- GUGGENHEIM, B. Lana (déc. 2018). *Portugal's Roadmap to Carbon Neutrality*. URL : <https://www.southeusummit.com/europe/portugal/portuguese-government-launches-climate-plan-with-ambitious-carbon-neutral-target/> (visité le 28/01/2019) (Cité p. 141).
- HAJER, Maarten A (1995). *The Politics of Environmental Discourse : Ecological Modernization and the Policy Process*. Clarendon Press Oxford (Cité p. 21).
- HAMMERSLEY, G. (1957). « The Crown Woods and Their Exploitation in the Sixteenth and Seventeenth Centuries<sup>1</sup> ». Dans : *Historical Research* 30.82, p. 136-161. ISSN : 1468-2281. DOI : [10.1111/j.1468-2281.1957.tb01369.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-2281.1957.tb01369.x) (Cité p. 34).
- HANSEN, Jean-Pierre et Jacques PERCEBOIS (août 2017). *Transition(s) électrique(s) : Ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire*. Éditions Odile Jacob (Cité p. 121).
- HARVEY, David (2003). *The New Imperialism*. Clarendon Lectures in Geography and Environmental Studies. Oxford University Press, USA. ISBN : 978-0-19-927808-4. URL : <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=735BDA5E7B36651C7355753FEFAE5708> (visité le 17/05/2019) (Cité p. 21).

- HASSAN, Fekri A. (1979). « Demography and Archaeology ». Dans : *Annual Review of Anthropology* 8.1, p. 137-160. DOI : [10.1146/annurev.an.08.100179.001033](https://doi.org/10.1146/annurev.an.08.100179.001033) (Cité p. 36).
- HAXELTINE, Alex, Lorraine WHITMARSH, Noam BERGMAN, Jan ROTMANS, Michel SCHILPEROORD et Jonathan KOHLER (2008). « A Conceptual Framework for Transition Modelling ». Dans : *International Journal of Innovation and Sustainable Development* 3.1-2, p. 93-114. URL : <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISD.2008.018195> (visité le 09/08/2017) (Cité p. 26).
- HELBING, Dirk et Sergi LOZANO (mai 2010). « Phase Transitions to Cooperation in the Prisoner's Dilemma ». Dans : *Physical Review E* 81.5, p. 057102. DOI : [10.1103/PhysRevE.81.057102](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.81.057102) (Cité p. 212).
- HENDRIKS, Carolyn M. (nov. 2009). « Policy Design without Democracy? Making Democratic Sense of Transition Management ». Dans : *Policy Sciences* 42.4, p. 341-368. ISSN : 0032-2687, 1573-0891. DOI : [10.1007/s11077-009-9095-1](https://doi.org/10.1007/s11077-009-9095-1) (Cité p. 208).
- HENRIQUES, Sofia Teives et Karol J. BOROWIECKI (fév. 2017). « The Drivers of Long-Run CO<sub>2</sub> Emissions in Europe, North America and Japan since 1800 ». Dans : *Energy Policy* 101, p. 537-549. ISSN : 03014215. DOI : [10.1016/j.enpol.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.005) (Cité p. 115).
- HERBERT, Éric, Christophe GOUPIL, Yves D'ANGELO, Aurélie-Louis NAPOLÉON et Gaël GIRAUD (mar. 2018). « What Thermodynamics Can Teach Us about Economy : Theory and Practice ». Dans : *École Des Houches Science & Énergie* (Cité p. 213).
- HERCULANO-HOUZEL, Suzana (avr. 2016). *The Human Advantage : A New Understanding of How Our Brain Became Remarkable*. The MIT Press. ISBN : 978-0-262-33321-4. DOI : [10.7551/mitpress/9780262034258.001.0001](https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262034258.001.0001) (Cité p. 36).
- HÉRITIER, Michel (sept. 2013a). « Chap.3 Approximations de champ moyen ». Dans : *Physique de la matière condensée : Des atomes froids aux supraconducteurs à haute température critique*. EDP Sciences, p. 81-112. ISBN : 978-2-7598-1097-0 (Cité p. 241).
- (sept. 2013b). *Physique de la matière condensée : Des atomes froids aux supraconducteurs à haute température critique*. EDP Sciences. ISBN : 978-2-7598-1097-0 (Cité p. 218).
- HIRSH, Richard F. et Christopher F. JONES (mar. 2014). « History's Contributions to Energy Research and Policy ». Dans : *Energy Research & Social Science* 1, p. 106-111. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2014.02.010](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.010) (Cité p. 18, 33, 34, 63).
- HOPWOOD, Bill, Mary MELLOR et Geoff O'BRIEN (2005). « Sustainable Development : Mapping Different Approaches ». Dans : *Sustainable Development* 13.1, p. 38-52. ISSN : 1099-1719. DOI : [10.1002/sd.244](https://doi.org/10.1002/sd.244) (Cité p. 16).
- HORS, Irène (1995). « Des modèles de transition de phase en économie? ». Dans : *Revue économique* 46.3, p. 817-826. ISSN : 0035-2764. DOI : [10.3406/reco.1995.409693](https://doi.org/10.3406/reco.1995.409693) (Cité p. 212).

- HOTELLING, Harold (avr. 1931). « The Economics of Exhaustible Resources ». Dans : *Journal of Political Economy* 39.2, p. 137-175. ISSN : 0022-3808. DOI : [10.1086/254195](https://doi.org/10.1086/254195) (Cité p. 35).
- HOURCADE, Jean-Charles (2015). « La taxe carbone : une idée toujours d'avenir si... » Dans : *Revue de l'OFCE* 139.3, p. 167. ISSN : 1265-9576, 1777-5647. DOI : [10.3917/reof.139.0167](https://doi.org/10.3917/reof.139.0167) (Cité p. 139).
- HOURCADE, Jean-Charles, Antonin POTTIER et Etienne ESPAGNE (oct. 2018). « Social Value of Mitigation Activities and Forms of Carbon Pricing ». Dans : *International Economics*. Special issue on 'Social values of carbon and climate policy signals in the post-COP21 context' 155, p. 8-18. ISSN : 2110-7017. DOI : [10.1016/j.inteco.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.inteco.2018.06.001) (Cité p. 125).
- HUGUES, Paul (2015). « Stratégies Technologique et Réglementaire de Déploiement Des Filières Bioénergies Françaises ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (Cité p. 74).
- HUGUES, Paul, Edi ASSOUMOU et Nadia MAÏZI (oct. 2016). « Assessing GHG Mitigation and Associated Cost of French Biofuel Sector : Insights from a TIMES Model ». Dans : *Energy* 113, p. 288-300. ISSN : 0360-5442. DOI : [10.1016/j.energy.2016.06.146](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.146) (Cité p. 268).
- INERIS (nov. 2017). *Captage et Stockage Géologique Du CO<sub>2</sub> : Retour d'expérience et Perspectives*. Rapp. tech. DRS-17-164859-08281A. INERIS (Cité p. 90).
- INSEE (2014). *EACEI, Enquête Sur La Consommation d'énergie Dans l'industrie 2014*. URL : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/operation/s1291/presentation> (Cité p. 275, 278).
- IPBES (mai 2019). *Summary for Policymakers IPBES Global Assessment*. Rapp. tech. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. URL : <https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services> (Cité p. 2).
- IPCC (2007). *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. OCLC : 934551357. Geneva, Switzerland : IPCC. ISBN : 978-92-9169-122-7 (Cité p. 17).
- (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. OCLC : 914851124. Geneva, Switzerland : IPCC. ISBN : 978-92-9169-143-2 (Cité p. 17).
  - (2018a). *Global Warming of 1.5°C Summary for Policymakers*. OCLC : 1056192590. Geneva, Switzerland : IPCC. ISBN : 978-92-9169-151-7. URL : <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (visité le 22/01/2019) (Cité p. 19, 20, 61).
  - (2018b). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock,

- S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.) In Press (Cité p. 17, 248).
- IRENA (mai 2019). *Renewable Power Generation Costs in 2018*. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency. ISBN : 978-92-9260-126-3 (Cité p. 73, 173).
- ISING, Ernst (fév. 1925). « Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus ». Dans : *Zeitschrift für Physik* 31.1, p. 253-258. ISSN : 0044-3328. DOI : [10.1007/BF02980577](https://doi.org/10.1007/BF02980577) (Cité p. 239).
- JACKSON, Robert B., Josep G. CANADELL, Corinne LE QUÉRÉ, Robbie M. ANDREW, Jan Ivar KORSBAKKEN, Glen P. PETERS et Nebojsa NAKICENOVIC (2016). « Reaching Peak Emissions ». Dans : *Nature Climate Change* 6, p. 7-10. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate2892](https://doi.org/10.1038/nclimate2892) (Cité p. 3).
- JASANOFF, Sheila (jan. 2018). « Just Transitions : A Humble Approach to Global Energy Futures ». Dans : *Energy Research & Social Science*. SI : Energy and the Future 35, p. 11-14. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2017.11.025](https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.025) (Cité p. 15).
- JAYNES, E. T. (mai 1957). « Information Theory and Statistical Mechanics ». Dans : *Physical Review* 106.4, p. 620-630. DOI : [10.1103/PhysRev.106.620](https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620) (Cité p. 214).
- JEVONS, William Stanley (1866). *The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*. second edition. London : MacMillan (Cité p. 34, 40).
- JOHANSSON, Bengt, Paal BOERJESSON, Karin ERICSSON, Lars J. NILSSON et Per SVENNINGSSON (2002). *The Use of Biomass for Energy in Sweden. Critical Factors and Lessons Learned*. Rapp. tech. LUTFD2-TFEM-02-3030. Lund Inst. of Tech. (Sweden). Dept. of Energy and Environmental System Studies. URL : [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:42022188](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:42022188) (visité le 28/08/2018) (Cité p. 181).
- JRC, Joint Research Centre (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Documents*. URL : <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/> (visité le 05/07/2019) (Cité p. 275).
- KADANOFF, Leo P. (juin 1966). « Scaling Laws for Ising Models near  $T_c$  ». Dans : *Physics Physique Fizika* 2.6, p. 263-272. DOI : [10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.2.263](https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.2.263) (Cité p. 242).
- KAIJSER, Arne et Per HÖGSELIUS (mar. 2019). « Under the Damocles Sword : Managing Swedish Energy Dependence in the Twentieth Century ». Dans : *Energy Policy* 126, p. 157-164. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2018.11.023](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.023) (Cité p. 180).
- KANDER, Astrid, Paolo MALANIMA et Paul WARDE (2013). *Power to the People : Energy in Europe over the Last Five Centuries*. The Princeton economic history of the western world. Princeton : Princeton University Press. ISBN : 978-0-691-14362-0 (Cité p. 35, 37, 39, 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 62, 66).
- KAVLAK, Goksin, James McNERNEY et Jessika E. TRANCIK (déc. 2018). « Evaluating the Causes of Cost Reduction in Photovoltaic Modules ». Dans :

- Energy Policy* 123, p. 700-710. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2018.08.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015) (Cité p. 73).
- KEMP, R. P. M., Arie RIP et Johan SCHOT (2001). « Constructing Transition Paths Through the Management of Niches ». Dans : *Path Dependence and Creation*, p. 269-299. URL : <https://research.utwente.nl/en/publications/constructing-transition-paths-through-the-management-of-niches> (visité le 27/10/2018) (Cité p. 24).
- KEMP, René (juin 2010). « The Dutch Energy Transition Approach ». Dans : *International Economics and Economic Policy* 7.2-3, p. 291-316. ISSN : 1612-4804, 1612-4812. DOI : [10.1007/s10368-010-0163-y](https://doi.org/10.1007/s10368-010-0163-y) (Cité p. 204).
- KEMP, René et Derk LOORBACH (2006). « Transition Management : A Reflexive Governance Approach ». Dans : *Reflexive Governance for Sustainable Development*. Sous la dir. de Jan-Peter VOSS, Dierk BAUKNECHT et René KEMP. Cheltenham : Edward Elgar Publishing, p. 103-130. ISBN : 978-1-84720-026-6 (Cité p. 23, 24, 26).
- KEMP, René, Jan ROTMANS et Derk LOORBACH (sept. 2007). « Assessing the Dutch Energy Transition Policy : How Does It Deal with Dilemmas of Managing Transitions? » Dans : *Journal of Environmental Policy & Planning* 9.3-4, p. 315-331. ISSN : 1523-908X. DOI : [10.1080/15239080701622816](https://doi.org/10.1080/15239080701622816) (Cité p. 204, 207).
- KERN, Florian (fév. 2012). « Using the Multi-Level Perspective on Socio-Technical Transitions to Assess Innovation Policy ». Dans : *Technological Forecasting and Social Change*. Contains Special Section : Emerging Technologies and Inequalities 79.2, p. 298-310. ISSN : 0040-1625. DOI : [10.1016/j.techfore.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.07.004) (Cité p. 21).
- (2013). « Implementing the Green Economy ». Dans : *Ökologisches Wirtschaften-Fachzeitschrift* 28.3, p. 20-22. URL : <http://www.oekologisches-wirtschaften.de/index.php/oew/article/view/1292> (visité le 21/09/2016) (Cité p. 207).
- KERN, Florian et Karoline S. ROGGE (déc. 2016). « The Pace of Governed Energy Transitions : Agency, International Dynamics and the Global Paris Agreement Accelerating Decarbonisation Processes? » Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 13-17. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.08.016](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.016) (Cité p. 52).
- KERN, Florian et Adrian SMITH (nov. 2008). « Restructuring Energy Systems for Sustainability? Energy Transition Policy in the Netherlands ». Dans : *Energy Policy*. Transition towards Sustainable Energy Systems 36.11, p. 4093-4103. ISSN : 03014215. DOI : [10.1016/j.enpol.2008.06.018](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.018) (Cité p. 204, 207, 208).
- KING, Carey W. (mai 2019). « A New Macroeconomic Growth Modeling Framework to Link Biophysical and Economic Principles ». Dans : *2nd International Conference on Energy Research and Social Science*. Arizona State University, Tempe, USA (Cité p. 213).
- KJEANG, Are, Jenny PALM et G. VENKATESH (déc. 2017). « Local Energy Advising in Sweden : Historical Development and Lessons for Future Policy-Making ». Dans : *Sustainability* 9.12, p. 2275. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su9122275](https://doi.org/10.3390/su9122275) (Cité p. 182).

- KLENERT, David, Linus MATTAUCH, Emmanuel COMBET, Ottmar EDENHOFER, Cameron HEPBURN, Ryan RAFATY et Nicholas STERN (août 2018). « Making Carbon Pricing Work for Citizens ». Dans : *Nature Climate Change* 8.8, p. 669. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/s41558-018-0201-2](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0201-2) (Cité p. 137).
- KONDRATIEV, N. D. et W. F. STOLPER (nov. 1935). « The Long Waves in Economic Life ». Dans : *The Review of Economics and Statistics* 17.6, p. 105. ISSN : 00346535. DOI : [10.2307/1928486](https://doi.org/10.2307/1928486) (Cité p. 213).
- KRAKOWSKI, Vincent, Edi ASSOUMOU, Vincent MAZAUIC et Nadia MAÏZI (juin 2016). « Feasible Path toward 40–100% Renewable Energy Shares for Power Supply in France by 2050 : A Prospective Analysis ». Dans : *Applied Energy* 171, p. 501-522. ISSN : 0306-2619. DOI : [10.1016/j.apenergy.2016.03.094](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.094) (Cité p. 268).
- KRAUSE, Florentin, Hartmut BOSSEL et Karl-Friedrich MÜLLER-REISSMANN (1980). *Energie-Wende : Wachstum Und Wohlstand Ohne Erdöl Und Uran : Ein Alternativ-Bericht*. Frankfurt am Main : S. Fischer. ISBN : 978-3-10-007705-9 (Cité p. 11, 12, 103).
- KRAUSMANN, Fridolin (2013). « The Social Metabolism of European Industrialization : Changes in the Relation of Energy and Land Use from the Eighteenth to the Twentieth Century ». Dans : *Energy Transitions in History : Global Cases of Continuity and Change*. Sous la dir. de Richard W. UNGER. RCC Perspectives. Munich : Rachel Carson Center for Environment and Society, p. 31-36 (Cité p. 40).
- KROOK-RIEKKOLA, Anna (2015). *National Energy System Modelling for Supporting Energy and Climate Policy Decision-Making : The Case of Sweden*. Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola N.S., 3883. OCLC : 931943437. Göteborg : Chalmers Univ. of Technology. ISBN : 978-91-7597-202-2 (Cité p. 184).
- KROOK-RIEKKOLA, Anna, Charlotte BERG, Erik O. AHLGREN et Patrik SÖDERHOLM (déc. 2017). « Challenges in Top-down and Bottom-up Soft-Linking : Lessons from Linking a Swedish Energy System Model with a CGE Model ». Dans : *Energy* 141, p. 803-817. ISSN : 0360-5442. DOI : [10.1016/j.energy.2017.09.107](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.107) (Cité p. 186).
- KROOK-RIEKKOLA, Anna et Erik SANDBERG (2018). « Net-Zero CO<sub>2</sub>-Emission Pathways for Sweden by Cost-Efficient Use of Forestry Residues ». Dans : *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C : Energy System Modelling and Policy Development*. T. 64. Lecture Notes in Energy. Cham, Switzerland : Springer, p. 123-136. ISBN : 978-3-319-74423-0 (Cité p. 185).
- LACROIX, Valérie et Edwin ZACCAÏ (2010). « Quarante ans de politique environnementale en France : évolutions, avancées, constante ». Dans : *Revue française d'administration publique* 134.2, p. 205. ISSN : 0152-7401, 1965-0620. DOI : [10.3917/rfap.134.0205](https://doi.org/10.3917/rfap.134.0205) (Cité p. 77, 80, 81, 119, 121).
- LAES, Erik, Leen GORISSEN et Frank NEVENS (fév. 2014). « A Comparison of Energy Transition Governance in Germany, The Netherlands and the United Kingdom ». Dans : *Sustainability* 6.3, p. 1129-1152. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su6031129](https://doi.org/10.3390/su6031129) (Cité p. 173).
- LANDAU, Lev Davidovich (1937). « On the Theory of Phase Transitions ». Dans : *Ukr. J. Phys.* 11, p. 19-32 (Cité p. 219, 240).

- LANFORD, O. E. et D. RUELLE (sept. 1969). « Observables at Infinity and States with Short Range Correlations in Statistical Mechanics ». Dans : *Communications in Mathematical Physics* 13.3, p. 194-215. ISSN : 1432-0916. DOI : [10.1007/BF01645487](https://doi.org/10.1007/BF01645487) (Cité p. 239).
- LANGEVIN, P. (1905). « Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique ». Dans : *Journal de Physique Théorique et Appliquée* 4.1, p. 165-183. ISSN : 0368-3893. DOI : [10.1051/jphystap:019050040016500](https://doi.org/10.1051/jphystap:019050040016500) (Cité p. 211, 217).
- LE DÉAUT, Jean-Yves, Roland COURTEAU et Bruno SIDO (fév. 2016). *De La Biomasse à La Bioéconomie : Une Stratégie Pour La France*. Rapport Au Nom de l'Office Parlementaire d'évaluation Des Choix Scientifiques et Technologiques 380. Sénat, Assemblée Nationale. URL : <http://www.senat.fr/rap/r15-380/r15-380.html%5C#toc113> (Cité p. 73).
- LE HIR, Pierre et Nabil WAKIM (juin 2019). « Nucléaire : l'EPR de Flamanville connaît de nouveaux retards et ne pourra pas démarrer avant 2022 ». Dans : *Le Monde*. URL : [https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/06/20/nucleaire-nouveau-retard-confirme-pour-l-epr-de-flamanville\\_5478853\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/06/20/nucleaire-nouveau-retard-confirme-pour-l-epr-de-flamanville_5478853_3234.html) (visité le 05/07/2019) (Cité p. 72).
- LE MONDE AVEC AFP (jan. 2006). « La SNCF se dit favorable au "tout électrique" ». Dans : *Le Monde.fr*. URL : [https://www.lemonde.fr/planete/article/2006/01/05/la-sncf-se-dit-favorable-au-tout-electrique\\_727922\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2006/01/05/la-sncf-se-dit-favorable-au-tout-electrique_727922_3244.html) (visité le 21/09/2019) (Cité p. 282).
- LEVREL, Harold et Antoine MISSEMER (2016). « L'économicisation de La Nature, Réalités Historiques et Mythes Contemporains ». Dans : *FAERE Working paper* 2016.24. ISSN : 2274-5556. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01387121/> (visité le 17/11/2016) (Cité p. 20).
- LOCKWOOD, Matthew (oct. 2013). « The Political Sustainability of Climate Policy : The Case of the UK Climate Change Act ». Dans : *Global Environmental Change* 23.5, p. 1339-1348. ISSN : 0959-3780. DOI : [10.1016/j.gloenvcha.2013.07.001](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.001) (Cité p. 99).
- LOORBACH, Derk (2010). « Transition Management for Sustainable Development : A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework ». Dans : *Governance* 23.1, p. 161-183. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-0491.2009.01471.x/full> (visité le 15/06/2016) (Cité p. 23, 200, 201, 202, 203).
- LOORBACH, Derk et Jan ROTMANS (avr. 2010). « The Practice of Transition Management : Examples and Lessons from Four Distinct Cases ». Dans : *Futures* 42.3, p. 237-246. ISSN : 00163287. DOI : [10.1016/j.futures.2009.11.009](https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.11.009) (Cité p. 204).
- LOORBACH, Derk Albert (2007). *Transition Management : New Mode of Governance for Sustainable Development*. OCLC : 255678445. Utrecht : Internat. Books. ISBN : 978-90-5727-057-4 (Cité p. 21, 201, 203).
- LORENZONI, Irene et David BENSON (nov. 2014). « Radical Institutional Change in Environmental Governance : Explaining the Origins of the UK Climate Change Act 2008 through Discursive and Streams Perspectives ». Dans : *Global Environmental Change* 29, p. 10-21. ISSN : 0959-3780. DOI : [10.1016/j.gloenvcha.2014.07.011](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.07.011) (Cité p. 99).

- LÖSCHEL, Andreas, Georg ERDMANN, Frithjof STAISS et Hans-Joachim ZIESING (juin 2018). *Stellungnahme Zum Sechsten Monitoring - Bericht Der Bundesregierung Für Das Berichtsjahr 2016*. Rapp. tech. Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ (Cité p. 104).
- LOULOU, Richard, Gary GOLDSTEIN, Amit KANUDIA, Antti LETTILA et Uwe REMME (juil. 2016). *Documentation for the TIMES Model Part I : TIMES Concepts and Theory*. Rapp. tech. ETSAP. URL : <http://iea-etsap.org/index.php/%5C%0020documentation> (Cité p. 268).
- LUTZENHISER, Loren (nov. 1993). « Social and Behavioral Aspects of Energy Use ». Dans : *Annual Review of Energy and the Environment* 18.1, p. 247-289. ISSN : 1056-3466. DOI : [10.1146/annurev.eg.18.110193.001335](https://doi.org/10.1146/annurev.eg.18.110193.001335) (Cité p. 21).
- MADUREIRA, Nuno Luís (fév. 2008). « When the South Emulates the North : Energy Policies and Nationalism in the Twentieth Century ». Dans : *Contemporary European History* 17.1, p. 1-21. ISSN : 1469-2171, 0960-7773. DOI : [10.1017/S0960777307004250](https://doi.org/10.1017/S0960777307004250) (Cité p. 57).
- MAÏZI, Nadia et Edi ASSOUMOU (2007). « Modélisation Prospective et Spécificités de La Politique Énergétique Française ». Dans : *J3eA* 6, p. 2 (Cité p. 272).
- (déc. 2014). « Future Prospects for Nuclear Power in France ». Dans : *Applied Energy* 136, p. 849-859. ISSN : 0306-2619. DOI : [10.1016/j.apenergy.2014.03.056](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.056) (Cité p. 72).
- MARCHETTI, C. (jan. 1977). « Primary Energy Substitution Models : On the Interaction between Energy and Society ». Dans : *Technological Forecasting and Social Change* 10.4, p. 345-356. ISSN : 0040-1625. DOI : [10.1016/0040-1625\(77\)90031-2](https://doi.org/10.1016/0040-1625(77)90031-2) (Cité p. 52).
- MARESCA, Bruno et Anne DUJIN (2014). « La transition énergétique à l'épreuve du mode de vie ». Dans : *Flux* 2.96, p. 10-23. ISSN : 1154-2721. DOI : [10.3917/flux.096.0010](https://doi.org/10.3917/flux.096.0010) (Cité p. 10, 262).
- MARIS, Virginie (2014). *Nature à vendre*. Editions Quæ. ISBN : 978-2-7592-2131-8. DOI : [10.3917/quae.maris.2014.01](https://doi.org/10.3917/quae.maris.2014.01) (Cité p. 20).
- MARKARD, Jochen, Marko HEKKERT et Staffan JACOBSSON (sept. 2015). « The Technological Innovation Systems Framework : Response to Six Criticisms ». Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 16, p. 76-86. ISSN : 2210-4224. DOI : [10.1016/j.eist.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.006) (Cité p. 26).
- MARKARD, Jochen, Rob RAVEN et Bernhard TRUFFER (juil. 2012). « Sustainability Transitions : An Emerging Field of Research and Its Prospects ». Dans : *Research Policy*. Special Section on Sustainability Transitions 41.6, p. 955-967. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/j.respol.2012.02.013](https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013) (Cité p. 22, 26).
- MASSARD-GUILBAUD, Geneviève (déc. 2018). « From the History of Sources and Sectors to the History of Systems and Transitions : How the History of Energy Has Been Written in France and beyond | Energy History ». Dans : *Journal of Energy History/Revue d'Histoire de l'Énergie [En ligne]* 1. ISSN : 2649-3055. URL : <https://energyhistory.eu/fr/dossier/history-sources-and-sectors-history-systems-and-transitions-how-history-energy->

- has-been%5C#footnoteref92\_h3qxi4 (visité le 17/05/2019) (Cité p. 34, 39, 64, 65).
- MATTAR, Sennan, Stephen KANSUK et Tahseen JAFRY (mai 2019). « Global Climate Finance Is Still Not Reaching Those Who Need It Most ». Dans : *The Conversation*. URL : <http://theconversation.com/global-climate-finance-is-still-not-reaching-those-who-need-it-most-115268> (visité le 19/09/2019) (Cité p. 137).
- MATTI, Simon (2009). « Exploring Public Policy Legitimacy : A Study of Belief-System Correspondence in Swedish Environmental Policy ». OCLC : 941160940. Thèse de doct. Luleå : Political Science Unit, Luleå University of Technology (Cité p. 179).
- MCDOWALL, Will (nov. 2014). « Exploring Possible Transition Pathways for Hydrogen Energy : A Hybrid Approach Using Socio-Technical Scenarios and Energy System Modelling ». Dans : *Futures* 63, p. 1-14. ISSN : 0016-3287. DOI : [10.1016/j.futures.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.07.004) (Cité p. 29).
- MCDOWALL, Will et Frank W. GEELS (juil. 2016). « Ten Challenges for Computer Models in Transitions Research : Commentary on Holtz et Al. » Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions*. ISSN : 2210-4224. DOI : [10.1016/j.eist.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.07.001) (Cité p. 29).
- MEADOWCROFT, James (juil. 2009). « What about the Politics ? Sustainable Development, Transition Management, and Long Term Energy Transitions ». Dans : *Policy Sciences* 42.4, p. 323-340. ISSN : 0032-2687, 1573-0891. DOI : [10.1007/s11077-009-9097-z](https://doi.org/10.1007/s11077-009-9097-z) (Cité p. 205, 206, 209).
- (juin 2011). « Engaging with the Politics of Sustainability Transitions ». Dans : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1.1, p. 70-75. ISSN : 2210-4224. DOI : [10.1016/j.eist.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.003) (Cité p. 208).
- MEADOWS, Donella H., Dennis L. MEADOWS, Jorgen RANDERS et William W. BEHRENS III (1972). *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. 2. ed. Potomac Associates books. OCLC : 832406700. New York : Universe Books. ISBN : 978-0-87663-165-2 978-0-87663-901-6 (Cité p. 10, 12, 30, 35).
- MEDDE (mai 2014). *Stratégie Nationale de Transition Écologique Vers Un Développement Durable 2015- 2020*. Rapp. tech. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (Cité p. 97).
- (2015). *Stratégie Nationale Bas-Carbone*. Rapp. tech. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (Cité p. 93, 116).
- MEILHAN, Nicolas (juin 2019). « Comment Faire Enfin Baisser Les Émissions de CO2 Des Voitures ». Dans : *La Note d'analyse* 78 (Cité p. 126).
- MEYER, D., L. MYTELKA, R. PRESS, E. L. DALL'OGGIO, P. TEIXEIRA DE SOUSA JR. et A. GRUBLER (mar. 2014). « Brazilian Ethanol : Unpacking a Success Story of Energy Technology Innovation ». Dans : *Energy Technology Innovation : Learning from Historical Successes and Failures*. Sous la dir. d'A. GRUBLER et C. WILSON. Cambridge : Cambridge University Press. ISBN : 978-1-107-02322-2. URL : <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11076/> (visité le 21/05/2019) (Cité p. 50).

- MEYER, Teva (nov. 2017a). « Du carbon lock-in au nuclear lock-in : les verrous spatiaux aux changements de politique nucléaire en Suède ». Dans : *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* Vol. 8, n°3. ISSN : 1772-9971. DOI : [10.4000/developpementdurable.11936](https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11936) (Cité p. 180).
- (2017b). « Nucléaire et question climatique : construction et conséquences d'un discours géopolitique en France et en Suède ». Dans : *Hérodote* 2.165, p. 67-90. ISSN : 0338-487X. DOI : [10.3917/her.165.0067](https://doi.org/10.3917/her.165.0067) (Cité p. 71, 180, 181).
- (mai 2017c). « Une Analyse Comparative Des Géopolitiques Du Nucléaire Civil En Allemagne, En France et En Suède ». Thèse de Doctorat. Paris : Paris 8 (Cité p. 57, 71, 177).
- MICHANEK, Gabriel et Patrik SÖDERHOLM (oct. 2009). « Licensing of Nuclear Power Plants : The Case of Sweden in an International Comparison ». Dans : *Energy Policy* 37.10, p. 4086-4097. ISSN : 03014215. DOI : [10.1016/j.enpol.2009.04.051](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.051) (Cité p. 180).
- MICHEL, P. et Y. MENARD (fév. 2009). *SOCECO<sub>2</sub> - Évaluation Technico-Économique et Environnementale de La Filière Captage, Transport, Stockage Du CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 En France*. Rapp. tech. RP-57036-FR. BRGM, p. 89 (Cité p. 148, 149, 293).
- MIKHAILOV, Alexander et Vera CALENBUHR (2002). *From Cells to Societies : Models of Complex Coherent Action*. Springer Series in Synergetics. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag. ISBN : 978-3-540-42164-1 (Cité p. 211).
- MILLER, Clark A., Jennifer RICHTER et Jason O'LEARY (mar. 2015). « Socio-Energy Systems Design : A Policy Framework for Energy Transitions ». Dans : *Energy Research & Social Science* 6, p. 29-40. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.11.004) (Cité p. 18).
- MILLOT, Ariane, Rémy DOUDARD, Thomas Le GALLIC, François BRIENS, Edi ASSOUMOU et Nadia MAÏZI (2018). « France 2072 : Lifestyles at the Core of Carbon Neutrality Challenges ». Dans : *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C : Energy System Modelling and Policy Development*. T. 64. Lecture Notes in Energy. Cham, Switzerland : Springer, p. 173-190. ISBN : 978-3-319-74423-0. DOI : [10.1007/978-3-319-74424-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74424-7_11) (Cité p. 137, 273).
- MILTON, Katharine (1999). « A Hypothesis to Explain the Role of Meat-Eating in Human Evolution ». Dans : *Evolutionary Anthropology : Issues, News, and Reviews* 8.1, p. 11-21. ISSN : 1520-6505. DOI : [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6505\(1999\)8:1%3C11::AID-EVAN6%3E3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6505(1999)8:1%3C11::AID-EVAN6%3E3.0.CO;2-M) (Cité p. 36).
- MITCHELL, Timothy (nov. 2011). *Carbon Democracy : Political Power in the Age of Oil*. Verso Books. ISBN : 978-1-84467-745-0 (Cité p. 36).
- MOKYR, Joel (2009). *The Enlightened economy an economic history of Britain 1700-1850*. New Haven et London : Yale University Press. ISBN : 978-0-300-12455-2 (Cité p. 44, 47).
- MOL, Arthur P. J. et Gert SPAARGAREN (mar. 2000). « Ecological Modernisation Theory in Debate : A Review ». Dans : *Environmental Politics* 9.1, p. 17-49. ISSN : 0964-4016. DOI : [10.1080/09644010008414511](https://doi.org/10.1080/09644010008414511) (Cité p. 21).

- MORRIS, Craig et Arne JUNGJOHANN (sept. 2016). *Energy Democracy : Germany's Energiewende to Renewables*. Springer. ISBN : 978-3-319-31891-2 (Cité p. 12).
- MTES, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (juil. 2017). *Plan Climat*. URL : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2017.07.06%5C%20-%5C%20Plan%5C%20Climat.pdf> (visité le 25/07/2017) (Cité p. 61, 84, 118, 130, 141).
- (déc. 2018). *Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone*. Rapp. tech. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (Cité p. 90, 94, 95, 117, 141).
  - (jan. 2019). *Projet de Programmation Pluriannuelle de l'énergie*. Rapp. tech. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (Cité p. 94, 150).
- NADAL, Jean-Pierre et Mirta B. GORDON (déc. 2005). « Physique statistique de phénomènes collectifs en sciences économiques et sociales ». Dans : *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences* 43e année.172. ISSN : 0987-6936. DOI : 10.4000/msh.2969 (Cité p. 212).
- NEEDS (2009). *New Energy Externalities Development for Sustainability*. URL : <http://www.needs-project.org/> (Cité p. 275).
- NEF, J. U. (1932). *The Rise of the British Coal Industry*. London : George Routledge and Sons. ISBN : 978-0-7146-1346-8 (Cité p. 34).
- NÉGAWATT (jan. 2017). *Synthèse Scénario Négawatt 2017-2050*. Rapp. tech. Association négaWatt (Cité p. 72, 141).
- NESLEN, Arthur (juin 2016). « Norway Pledges to Become Climate Neutral by 2030 ». Dans : *The Guardian*. ISSN : 0261-3077. URL : <http://www.theguardian.com/environment/2016/jun/15/norway-pledges-to-become-climate-neutral-by-2030> (visité le 24/09/2017) (Cité p. 61, 141).
- NORDHAUS, William (avr. 2015). « Climate Clubs : Overcoming Free-Riding in International Climate Policy ». Dans : *American Economic Review* 105.4, p. 1339-1370. ISSN : 0002-8282. DOI : 10.1257/aer.15000001 (Cité p. 125).
- NORDHAUS, William D. (mar. 1993). « Rolling the 'DICE' : An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases ». Dans : *Resource and Energy Economics* 15.1, p. 27-50. ISSN : 0928-7655. DOI : 10.1016/0928-7655(93)90017-0 (Cité p. 66, 125).
- NORWEGIAN MINISTRY OF CLIMATE CHANGE AND ENVIRONMENT (jan. 2018). *Norway's Seventh National Communication - Under the Framework Convention on Climate Change*. Rapp. tech. Norwegian Ministry of Climate Change and Environment, p. 394 (Cité p. 61).
- O'CONNOR, Peter A. (nov. 2010). « Energy Transitions ». Dans : *The Pardee Papers* 12 (Cité p. 18, 51, 55, 57).
- OCDE (mai 2011). *Vers une croissance verte*. Études de l'OCDE sur la croissance verte. OCDE. ISBN : 978-92-64-11132-5. DOI : 10.1787/9789264111332-fr (Cité p. 82).
- ONSAGER, Lars (fév. 1944). « Crystal Statistics. I. A Two-Dimensional Model with an Order-Disorder Transition ». Dans : *Physical Review* 65.3-4, p. 117-149. DOI : 10.1103/PhysRev.65.117 (Cité p. 239).

- PAREDIS, Erik (oct. 2011). « Transition Management as a Form of Policy Innovation : A Case Study of Plan C, a Process in Sustainable Materials Management in Flanders ». Dans : *Working Paper* 26. URL : <https://biblio.ugent.be/publication/1967210/file/1967213> (visité le 14/06/2016) (Cité p. 204).
- (2013). « A Winding Road : Transition Management, Policy Change and the Search for Sustainable Development ». Thèse de Doctorat. Ghent, Belgium : Ghent University (Cité p. 207).
- (jan. 2015). *Governance for System Innovation : Sustainable Housing and Building in Flanders. An OECD Case Study*. Rapp. tech. Ghent : Policy Research Centre TRADO, Ghent University. URL : <https://biblio.ugent.be/publication/5956549/file/5956558> (visité le 16/06/2016) (Cité p. 204).
- PEARCE, David (1991). « The Role of Carbon Taxes in Adjusting to Global Warming ». Dans : *The Economic Journal* 101.407, p. 938-948. ISSN : 0013-0133. DOI : [10.2307/2233865](https://doi.org/10.2307/2233865) (Cité p. 137).
- PEARSON, Peter J G (déc. 2018). « Past, Present and Prospective Energy Transitions : An Invitation to Historians ». Dans : *Journal of Energy History/Revue d'Histoire de l'Énergie [En ligne]* 1, p. 45. ISSN : 2649-3055. URL : <http://energyhistory.eu/node/57> (Cité p. 17, 50, 58, 63, 64, 265).
- PEARSON, Peter J. G. et Timothy J. FOXON (nov. 2012). « A Low Carbon Industrial Revolution? Insights and Challenges from Past Technological and Economic Transformations ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 117-127. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.07.061](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.061) (Cité p. 33, 47, 59, 62).
- PERELMAN, Lewis J., August W. GIEBELHAUS et Michael D. YOKELL (1981). *Energy Transitions : Long-Term Perspectives*. ARAGON (Cité p. 10).
- PETERS, Glen P., Robbie M. ANDREW, Tom BODEN, Josep G. CANADELL, Philippe CIAIS, Corinne LE QUÉRÉ, Gregg MARLAND, Michael R. RAUPACH et Charlie WILSON (jan. 2013). « The Challenge to Keep Global Warming below 2 °C ». Dans : *Nature Climate Change* 3, p. 4-6. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate1783](https://doi.org/10.1038/nclimate1783) (Cité p. 3).
- PETERS, Glen P., Robbie M. ANDREW, Josep G. CANADELL, Sabine FUSS, Robert B. JACKSON, Jan Ivar KORSBAKKEN, Corinne LE QUÉRÉ et Nebojsa NAKICENOVIC (fév. 2017). « Key Indicators to Track Current Progress and Future Ambition of the Paris Agreement ». Dans : *Nature Climate Change* 7.2, p. 118-122. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate3202](https://doi.org/10.1038/nclimate3202) (Cité p. 3).
- PIGOU, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. London : Macmillan (Cité p. 124).
- POCHEZ, Rémi, Nicolas WAGNER et Isabelle CABANNE (juil. 2016). *Projections de La Demande de Transport Sur Le Long Terme*. Rapp. tech. CGDD (Commissariat général au développement durable) (Cité p. 281, 282).
- POLLITT, Michael G. (nov. 2012). « The Role of Policy in Energy Transitions : Lessons from the Energy Liberalisation Era ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 128-137. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.03.004](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.004) (Cité p. 121).

- POMERANZ, Kenneth (2000). *The Great Divergence : China, Europe, and the Making of the Modern World Economy*. The Princeton economic history of the Western world. Princeton, NJ : Princeton University Press. ISBN : 978-0-691-00543-0 (Cité p. 44, 45, 46).
- POTTIER, Antonin (2014). « L'économie dans l'impasse climatique : développement matériel, théorie immatérielle et utopie auto-stabilisatrice ». Thèse de doctorat. Paris : EHESS, CIRED (Cité p. 31, 35, 77, 125, 213).
- (juil. 2016). « Comment l'environnement transforme-t-il la discipline économique ? » Dans : *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* N° 83.3, p. 45-49. ISSN : 1268-4783. URL : <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2016-3-page-45.htm> (visité le 15/04/2019) (Cité p. 126).
- POUJADE, Robert et Stéphane FRIoux (2012). « Le premier ministère de l'Environnement (1971-1974). L'invention d'un possible ». Dans : *Vingtième Siècle. Revue d'histoire* 1.113, p. 51-54. ISSN : 0294-1759. DOI : [10.3917/vin.113.0051](https://doi.org/10.3917/vin.113.0051) (Cité p. 77, 179).
- POUPEAU, François-Mathieu (jan. 2016). « Piloter La Transition Énergétique Par Les Démarches Stratégiques : Usine à Gaz Ou Atout Pour l'action Publique ? » Dans : *Le Quatre Pages du PUCA* 29. ISSN : 2427-8912. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-01264619/document> (visité le 09/08/2017) (Cité p. 98).
- PWC (juin 2018). *Les Réseaux de Chaleur, Analyses et Perspectives de Croissance. Tendances de La Transition Énergétique* 4. PWC. URL : <https://www.pwc.fr/fr/assets/files/.../pwc-transition-energetique-reseaux-de-chaleur.pdf> (Cité p. 74).
- QUÉRÉ, Corinne Le et al. (déc. 2018). « Global Carbon Budget 2018 ». Dans : *Earth System Science Data* 10.4, p. 2141-2194. ISSN : 1866-3508. DOI : <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018> (Cité p. 252).
- QUINET, Alain (mar. 2009). *La Valeur Tutélaire Du Carbone*. Rapports et Documents 16. Centre d'analyse stratégique (Cité p. 126).
- QUINET, Alain, Julien BUEB, Boris LE HIR, Bérengère MESQUI, Aude POMMERET et Matthieu COMBAUD (fév. 2019). *La valeur de l'action pour le climat*. Rapp. tech. France Stratégie, p. 190 (Cité p. 85, 123, 124, 127, 139, 149).
- QUINET, Emile (sept. 2013). *L'évaluation Socioéconomique Des Investissements Publics*. Rapp. tech. Commissariat général à la stratégie et à la prospective (Cité p. 148, 185).
- RAFTERY, Adrian E., Alec ZIMMER, Dargan M. W. FRIERSON, Richard STARTZ et Peiran LIU (sept. 2017). « Less than 2 °C Warming by 2100 Unlikely ». Dans : *Nature Climate Change* 7.9, p. 637. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate3352](https://doi.org/10.1038/nclimate3352) (Cité p. 3, 19).
- RENARD, Claire Le (août 2017). « Les débuts du programme électronucléaire français (1945-1974) : de l'exploratoire à l'industriel ». Dans : *Hérodote* 165, p. 53-66. ISSN : 0338-487X. DOI : [10.3917/her.165.0053](https://doi.org/10.3917/her.165.0053) (Cité p. 71).
- RES2020 (2009). *The Pan European TIMES Model for RES2020 Model Description and Definitions of Scenarios. Monitoring and Evaluation of the RES Directives Implementation in EU27 and Policy Recommendations for 2020. A*

- Project Funded under the Intelligent Energy for Europe Programme. Project No : EIE/06/170/SI2.442662. URL : <http://www.cres.gr/res2020/> (Cité p. 184, 272, 275).*
- REVOL, Henri (1998). *Les Conditions d'élaboration de La Politique Énergétique de La France et Les Conséquences Économiques, Sociales et Financières Des Choix Effectués, Rapport de M. Henri REVOL, Fait Au Nom de La Commission d'enquête (1997-1998)*. Rapp. tech. 439. Sénat. URL : [https://www.senat.fr/rap/197-4392/197-4392\\_mono.html%5C#toc6](https://www.senat.fr/rap/197-4392/197-4392_mono.html%5C#toc6) (Cité p. 77, 117).
- RIEDINGER, Nicolas (août 2018). « Les facteurs d'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie en France entre 1990 et 2016 ». Dans : *Datalab*. Sous la dir. de (Commissariat général au développement durable) CGDD, p. 38. ISSN : 2557-8138 (Cité p. 115, 116).
- RIFKIN, Jeremy (août 2003). *The Hydrogen Economy*. Penguin. ISBN : 978-1-4406-2511-4 (Cité p. 58).
- ROBBINS, Paul (nov. 2011). *Political Ecology : A Critical Introduction*. John Wiley & Sons. ISBN : 978-1-119-95335-7 (Cité p. 21).
- ROCKSTRÖM, Johan, Owen GAFFNEY, Joeri ROGELJ, Malte MEINSHAUSEN, Nebojsa NAKICENOVIC et Hans Joachim SCHELLNHUBER (mar. 2017). « A Roadmap for Rapid Decarbonization ». Dans : *Science* 355.6331, p. 1269-1271. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : [10.1126/science.aah3443](https://doi.org/10.1126/science.aah3443) (Cité p. 3).
- ROGELJ, Joeri, Gunnar LUDERER, Robert C. PIETZCKER, Elmar KRIEGLER, Michiel SCHAEFFER, Volker KREY et Keywan RIAHI (juin 2015). « Energy System Transformations for Limiting End-of-Century Warming to below 1.5 °C ». Dans : *Nature Climate Change* 5.6, p. 519-527. ISSN : 1758-6798. DOI : [10.1038/nclimate2572](https://doi.org/10.1038/nclimate2572) (Cité p. 3).
- ROGER, Simon et Rémi BARROUX (nov. 2016). « Laurence Tubiana : « L'accord de Paris sur le climat est une prophétie autoréalisatrice » ». Dans : *Le Monde*. ISSN : 1950-6244. URL : [http://www.lemonde.fr/conferences-climat/article/2016/11/19/laurence-tubiana-l-election-americaine-sera-un-test-de-verite-pour-l-accord-de-paris\\_5033966\\_5024922.html](http://www.lemonde.fr/conferences-climat/article/2016/11/19/laurence-tubiana-l-election-americaine-sera-un-test-de-verite-pour-l-accord-de-paris_5033966_5024922.html) (visité le 11/04/2017) (Cité p. 3, 17).
- ROGISSART, Lucile, Sébastien POSTIC et Julia GRIMAUULT (oct. 2018). « La composante carbone en France : fonctionnement, revenus et exonérations ». Dans : *I4CE Point Climat* 56. URL : <https://www.i4ce.org/download/la-contribution-climat-energie-en-france-fonctionnement-revenus-et-exoneration/> (visité le 22/10/2018) (Cité p. 126).
- ROJEY, Alexandre (2008). *Énergie & climat : réussir la transition énergétique*. Editions TECHNIP. ISBN : 978-2-7108-0908-1 (Cité p. 13).
- ROORDA, Chris et Julia WITTMAYER (juin 2014). *Transition Management in Five European Cities : An Evaluation*. Rapp. tech. Rotterdam : DRIFT, Université Erasme de Rotterdam (Cité p. 204).
- ROTMANS, Jan, René KEMP et Marjolein VAN ASSELT (2001). « More Evolution than Revolution : Transition Management in Public Policy ». Dans : *foresight* 3.1, p. 15-31. ISSN : 1463-6689. DOI : [10.1108/14636680110803003](https://doi.org/10.1108/14636680110803003) (Cité p. 23, 24, 200).

- RTE (2017a). *Bilan Prévisionnel de l'équilibre Offre-Demande d'électricité En France Édition 2017*. Rapp. tech. La Défense : RTE (Cité p. 72, 109, 142, 290).
- (oct. 2017b). *L'équilibre Offre-Demande d'électricité Pour l'hiver 2017-2018*. Rapp. tech. RTE (Cité p. 75).
  - (2019). *Parc National Annuel de Production Éolien et Solaire (2001 à 2018)*. URL : <https://opendata.reseaux-energies.fr/explore/dataset/parc-national-annuel-prod-eolien-solaire/information/> (Cité p. 73).
- RÜDINGER, Andreas (nov. 2014). « La Transition Énergétique En Suède : Un Aperçu Du Modèle Scandinave ». Dans : *Les cahiers de Global Chance* 36, p. 36-46 (Cité p. 173).
- (oct. 2018a). « Évaluation de l'état d'avancement de la transition bas-carbone en France ». Dans : *Étude* 12, p. 34. ISSN : 2258-7535 (Cité p. 150).
  - (juil. 2018b). « Le suivi et l'évaluation de la transition bas-carbone en France- Enjeux méthodologiques et recommandations. » Dans : *Studies* 07/18. Sous la dir. d'IDDRI, p. 24. ISSN : 2258-7535 (Cité p. 92, 96, 98, 99, 100).
  - (oct. 2018c). « Vers un tableau de bord de la transition bas-carbone en France ». Dans : *Etude de l'IDDRI* 11, p. 16. ISSN : 2258-7535 (Cité p. 96, 97, 99).
- RÜDINGER, Andreas, Michel COLOMBIER, Nicolas BERGHMANS, Patrick CRIQUI et Philippe MENANTEAU (fév. 2017). *La transition du système électrique français à l'horizon 2030*. Rapp. tech. 05/17. Paris, France : Iddri, p. 38 (Cité p. 72).
- RÜDINGER, Andreas et Lola VALLEJO (juil. 2018). « Le Comité pour le changement climatique au Royaume-Uni Quel retour d'expérience et quels enseignements pour la France ? » Dans : *Studies* 6/18, p. 20. ISSN : 2258-7535 (Cité p. 95, 101, 102).
- RUMPALA, Yannick (2008). « La Régulation Publique et l'inscription Gestionnaire Du « Développement Durable » Des Initiatives Stratégiques Aux Démarches de Contrôle Des Performances ». Dans : *Le Management Public En Mutation* (Cité p. 118).
- (déc. 2010). « Recherche de voies de passage au « développement durable » et réflexivité institutionnelle. Retour sur les prétentions à la gestion d'une transition générale ». Dans : *Revue Française de Socio-Économie* 6, p. 47-63. ISSN : 1966-6608. DOI : [10.3917/rfse.006.0047](https://doi.org/10.3917/rfse.006.0047) (Cité p. 16).
- SACHS, Ignacy (1980). *Stratégies de l'écodéveloppement*. Collection Développement et civilisations. Paris : Éditions Économie et humanisme : Éditions ouvrières. ISBN : 978-2-7082-2049-2 (Cité p. 11).
- SAUSSAY, Aurélien, Gissela Landa RIVERA, Paul MALLIET et Frédéric REYNÈS (déc. 2016). « Changer de mix : urgence et opportunité de la transition énergétique en France ». Dans : *OFCE Policy Brief*. OFCE, Sciences Po 8, p. 10 (Cité p. 66).
- SAWHILL, John C. (1978). *Energy : Managing the Transition : Report of the Trilateral Energy Task Force to the Trilateral Commission*. The Commission (Cité p. 10).

- SCHEFFER, Marten (2009). *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton studies in complexity. OCLC : ocn276340689. Princeton, N.J : Princeton University Press. ISBN : 978-0-691-12203-8 (Cité p. 212).
- SCHEFFER, Marten et Stephen R. CARPENTER (déc. 2003). « Catastrophic Regime Shifts in Ecosystems : Linking Theory to Observation ». Dans : *Trends in Ecology & Evolution* 18.12, p. 648-656. ISSN : 0169-5347. DOI : [10.1016/j.tree.2003.09.002](https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.09.002) (Cité p. 212).
- SHELLING, Thomas C. (1978). *Micromotives and Macrobehavior*. 1<sup>re</sup> éd. Fels Lectures on Public Policy Analysis. W. W. Norton. ISBN : 978-0-393-09009-3 (Cité p. 212).
- SCHOT, Johan et Frank W. GEELS (sept. 2008). « Strategic Niche Management and Sustainable Innovation Journeys : Theory, Findings, Research Agenda, and Policy ». Dans : *Technology Analysis & Strategic Management* 20.5, p. 537-554. ISSN : 0953-7325. DOI : [10.1080/09537320802292651](https://doi.org/10.1080/09537320802292651) (Cité p. 26).
- SCHOT, Johan, Laur KANGER et Geert VERBONG (mai 2016). « The Roles of Users in Shaping Transitions to New Energy Systems ». Dans : *Nature Energy* 1.5, p. 16054. ISSN : 2058-7546. DOI : [10.1038/nenergy.2016.54](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.54) (Cité p. 18).
- SCHULMAN, L. S. et P. E. SEIDEN (juil. 1986). « Percolation and Galaxies ». Dans : *Science (New York, N.Y.)* 233.4762, p. 425-431. ISSN : 0036-8075. DOI : [10.1126/science.233.4762.425](https://doi.org/10.1126/science.233.4762.425) (Cité p. 212).
- SCHUMPETER, Joseph (1939). « Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process. » Dans : p. 461 (Cité p. 213).
- SDES (mai 2018a). *Chiffres clés des énergies renouvelables - Edition 2018*. Rapp. tech. Service de la donnée et des études statistiques (SDES), Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, p. 84 (Cité p. 73).
- (2018b). *Compte satellite du logement (CSL)*. URL : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/compte-satellite-du-logement/> (visité le 15/08/2019) (Cité p. 110).
- (avr. 2019a). *Bilan énergétique de la France en 2018 - Données provisoires*. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-en-2018-donnees-provisoires> (visité le 19/05/2019) (Cité p. 178, 179).
- (mai 2019b). *Chiffres clés des énergies renouvelables - Edition 2019*. Rapp. tech. Service de la donnée et des études statistiques (SDES), Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, p. 84 (Cité p. 150).
- SELOSSE, Sandrine, Sabine GARABEDIAN, Olivia RICCI et Nadia MAÏZI (juin 2018). « The Renewable Energy Revolution of Reunion Island ». Dans : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, p. 99-105. ISSN : 1364-0321. DOI : [10.1016/j.rser.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.013) (Cité p. 268).
- SELOSSE, Sandrine et Olivia RICCI (nov. 2014). « Achieving Negative Emissions with BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) in the Power Sector : New Insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) Model ». Dans : *Energy* 76, p. 967-975. ISSN : 03605442. DOI : [10.1016/j.energy.2014.09.014](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.014) (Cité p. 268).

- SEYER, Claude (1980). « L'évolution de la consommation et de la production des différentes sources d'énergie en France entre 1970 et 1980 ». Dans : *Revue Géographique de l'Est* 20.1, p. 43-64. DOI : [10.3406/rgest.1980.2376](https://doi.org/10.3406/rgest.1980.2376) (Cité p. 76).
- SEYFANG, Gill et Alex HAXELTINE (juin 2012). « Growing Grassroots Innovations : Exploring the Role of Community-Based Initiatives in Governing Sustainable Energy Transitions ». Dans : *Environment and Planning C : Government and Policy* 30.3, p. 381-400. ISSN : 0263-774X, 1472-3425. DOI : [10.1068/c10222](https://doi.org/10.1068/c10222) (Cité p. 22).
- SFEN (mar. 2018). *Les Coûts de Production Du Nouveau Nucléaire Français*. Rapp. tech. Société Française de l'Energie Nucléaire (Cité p. 72).
- SHANNON, C. E. (juil. 1948). « A Mathematical Theory of Communication ». Dans : *The Bell System Technical Journal* 27.3, p. 379-423. ISSN : 0005-8580. DOI : [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x) (Cité p. 214).
- SHOVE, Elizabeth et Gordon WALKER (avr. 2007). « Caution! Transitions Ahead : Politics, Practice, and Sustainable Transition Management ». Dans : *Environment and Planning A* 39.4, p. 763-770. ISSN : 0308-518X, 1472-3409. DOI : [10.1068/a39310](https://doi.org/10.1068/a39310) (Cité p. 17, 208).
- (mai 2010). « Governing Transitions in the Sustainability of Everyday Life ». Dans : *Research Policy*. Special Section on Innovation and Sustainability Transitions 39.4, p. 471-476. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/j.respol.2010.01.019](https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.019) (Cité p. 21).
- SIKA (2014). *Samhällsekonomiska Principer Och Kalkylvärden För Transportsektorn : ASEK 5.1 [Socio-Economic Principles and Calculation Values for the Transport Sector]. Version 2014-04-01. Swedish Transport Administration* (Cité p. 185).
- SIMIAN, Benoit (nov. 2018). *Le Verdissement Des Matériels Roulants Du Transport Ferroviaire En France*. Rapp. tech. Assemblée nationale. URL : [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE\\_R2018-03MA\\_Verdissement\\_flotte\\_ferroviaire.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE_R2018-03MA_Verdissement_flotte_ferroviaire.pdf) (Cité p. 282).
- SIMOES, Sofia, Wouter NIJS, Pablo RUIZ CASTELLO, Alessandra SGOBBI, Daniela RADU, Pelin BOLAT, Christian THIEL et Stathis PETEVES (2013). *The JRC-EU-TIMES Model - Assessing the Long-Term Role of the SET Plan Energy Technologies*. EUR - Scientific and Technical Research Reports. Luxembourg : Publications Office of the European Union. DOI : [10.2790/97596](https://doi.org/10.2790/97596) (Cité p. 279, 283, 285).
- SINAI, IA. G (1976). *Introduction to Ergodic Theory*. OCLC : 1119404263. Princeton, N.J. : Princeton University Press. ISBN : 978-0-691-08182-3 (Cité p. 239).
- SINAI, Iakov (1982). *Theory of phase transitions : rigorous results*. 1st ed. International series in natural philosophy v. 108. Oxford ; New York : Pergamon Press. ISBN : 978-0-08-026469-1 (Cité p. 239).
- SMIL, Vaclav (oct. 1994). *Energy In World History*. Essays in world history. Boulder : Westview Press. ISBN : 978-0-8133-1902-5 (Cité p. 35).

- SMIL, Vaclav (2010a). « Chapter 3 National Transitions : Commonalities and Particularities ». Dans : *Energy Transitions : History, Requirements, Prospects*. OCLC : 732052762. Santa Barbara, Calif. : Praeger, p. 75-104. ISBN : 978-0-313-38177-5 978-0-313-38178-2 (Cité p. 70).
- (2010b). *Energy Transitions : History, Requirements, Prospects*. OCLC : 732052762. Santa Barbara, California : Praeger. ISBN : 978-0-313-38177-5 978-0-313-38178-2 (Cité p. 18, 30, 31, 35, 37, 49, 52, 55).
- (jan. 2013). « Energy Transitions ». Dans : *Energy Vision 2013 Energy Transitions : Past and Future*. World Economic Forum, p. 10 (Cité p. 15, 54, 56, 63).
- (déc. 2016). « Examining Energy Transitions : A Dozen Insights Based on Performance ». Dans : *Energy Research & Social Science* 22, p. 194-197. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.08.017](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.017) (Cité p. 52, 53, 62).
- (2017). *Energy Transitions : Global and National Perspectives*. ABC-CLIO, LLC. ISBN : 978-1-4408-5324-1 (Cité p. 37, 38, 47).
- SMITH, Adrian, Andy STIRLING et Frans BERKHOUT (déc. 2005). « The Governance of Sustainable Socio-Technical Transitions ». Dans : *Research Policy* 34.10, p. 1491-1510. ISSN : 00487333. DOI : [10.1016/j.respol.2005.07.005](https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005) (Cité p. 200).
- SOLÉ, Ricard V. (2011). *Phase Transitions*. Primers in complex systems. OCLC : ocn757257299. Princeton, N.J. : Princeton University Press. ISBN : 978-0-691-15075-8 (Cité p. 212).
- SOLOMON, Barry D. et Karthik KRISHNA (nov. 2011). « The Coming Sustainable Energy Transition : History, Strategies, and Outlook ». Dans : *Energy Policy*. Asian Energy Security 39.11, p. 7422-7431. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2011.09.009](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.009) (Cité p. 47, 49, 50, 53, 55, 56, 57, 60, 61).
- SOLOW, R. M. (déc. 1974). « Intergenerational Equity and Exhaustible Resources ». Dans : *The Review of Economic Studies* 41.5, p. 29-45. ISSN : 0034-6527. DOI : [10.2307/2296370](https://doi.org/10.2307/2296370) (Cité p. 35).
- SOLOW, Robert M. (août 1957). « Technical Change and the Aggregate Production Function ». Dans : *The Review of Economics and Statistics* 39.3, p. 312-320. ISSN : 0034-6535. DOI : [10.2307/1926047](https://doi.org/10.2307/1926047) (Cité p. 35).
- SOU 2016 :47 (2016). *Statens Offentliga Utredningar En Klimat- Och Luftvårdssstrategi För Sverige [A Climate Policy Framework and a Climate and Clean Air Strategy for Sweden]*, The Cross-Party Committee on Environmental Objectives, Swedish Government Official Reports Series (SOU), Stockholm (Cité p. 174, 180).
- SOVACOOOL, Benjamin K. (mar. 2016). « How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions ». Dans : *Energy Research & Social Science*. Energy Transitions in Europe : Emerging Challenges, Innovative Approaches, and Possible Solutions 13, p. 202-215. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2015.12.020](https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020) (Cité p. 18, 21, 38, 52, 54, 65, 70).
- SOVACOOOL, Benjamin K. et Frank W. GEELS (déc. 2016). « Further Reflections on the Temporality of Energy Transitions : A Response to Critics ». Dans :

- Energy Research & Social Science* 22, p. 232-237. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2016.08.013](https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.013) (Cité p. 52, 59, 61, 64, 66).
- SPENCER, Thomas et al. (nov. 2017). « Tracking Sectoral Progress in the Deep Decarbonisation of Energy Systems in Europe ». Dans : *Energy Policy* 110, p. 509-517. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2017.08.053](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.053) (Cité p. 115).
- STEFFEN, Will, Wendy BROADGATE, Lisa DEUTSCH, Owen GAFFNEY et Cornelia LUDWIG (2015). « The Trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration ». Dans : *The Anthropocene Review* 2.1, p. 81-98. DOI : [0.1177/2053019614564785](https://doi.org/10.1177/2053019614564785) (Cité p. 41).
- STERN, Nicholas (oct. 2006). *The Stern Review Report : The Economics of Climate Change*. London. Rapp. tech. HM Treasury (Cité p. 66, 99, 125).
- STIGLITZ, Joseph E, Nicholas STERN, M DUAN, O EDENHOFER, G GIRAUD, G HEAL, E LA ROVERE, A MORRIS, E MOYER, M PANGESTU et al. (mai 2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Rapp. tech. License : Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington DC : World Bank. URL : <https://www.carbonpricingleadership.org/report-of-the-highlevel-commission-on-carbon-prices/> (Cité p. 125).
- SWEDISH ENERGY AGENCY (2018). *Energy in Sweden Facts and Figures 2018*. URL : <https://www.energimyndigheten.se/statistik/energilagget/> (Cité p. 181).
- SWEDISH GOVERNMENT (1987). *Om miljöpolitiken inför 1990-talet. Government bill/Proposition 1987/88 :85*. URL : [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/proposition/om-miljopolitiken-infor-1990-talet\\_GB0385](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/proposition/om-miljopolitiken-infor-1990-talet_GB0385) (visité le 10/09/2018) (Cité p. 179).
- (juin 2016). *Ramöverenskommelse Mellan Socialdemokraterna, Moderaterna, Miljöpartiet de Gröna, Centerpartiet Och Kristdemokraterna*. URL : <https://www.regeringen.se/artiklar/2016/06/overenskommelse-om-den-svenska-energipolitiken/> (Cité p. 174).
- SYROTA, Jean (fév. 2008). *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 Rapports des groupes de travail de la commission Énergie - Volume 2*. Rapp. tech. OCLC : 254561145. Paris : Centre d'Analyse Stratégique (Cité p. 13).
- SYROTA, Jean et CENTRE D'ANALYSE STRATÉGIQUE (fév. 2008). *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 Rapport de la Commission Énergie - Volume 1*. T. 1. OCLC : 254557542. Paris : La Documentation Française. ISBN : 978-2-11-007080-7 (Cité p. 80).
- TECOLOTE RESEARCH (déc. 2015). *Aviation Fuel Efficiency Technology Assessment*. Rapp. tech. The International Council on Clean Transportation (Cité p. 282).
- THEODORIDIS, Dimitrios, Paul WARDE et Astrid KANDER (nov. 2018). « Trade and Overcoming Land Constraints in British Industrialization : An Empirical Assessment ». Dans : *Journal of Global History* 13.3, p. 328-351. ISSN : 1740-0228, 1740-0236. DOI : [10.1017/S1740022818000189](https://doi.org/10.1017/S1740022818000189) (Cité p. 46).
- THEYS, Jacques (déc. 2015a). « Chap. 17 Entre science et art pratique, nature et démocratie : la prospective de l'environnement écartelée ». Dans : *Un demi-siècle d'environnement entre science, politique et prospective*. Editions Quæ, p. 253-269. ISBN : 978-2-7592-2302-2 (Cité p. 92).

- THEYS, Jacques (2015b). « Le climat : une question de temps ». Dans : *Natures Sciences Sociétés* 23, S1-S2. ISSN : 1240-1307, 1765-2979. DOI : [10.1051/nss/2015012](https://doi.org/10.1051/nss/2015012) (Cité p. 262).
- (2017). « Prospective et Recherche Pour Les Politiques Publiques En Phase de Transition ». Dans : *Natures Sciences Sociétés* 25. Sous la dir. de Marcel JOLLIVET, Marie-Christine BAGNATI, Yves LE BARS, François PAPY, Claude MILLIER et Sylvie ZASSER, S84-S92. ISSN : 1240-1307, 1765-2979. DOI : [10.1051/nss/2017038](https://doi.org/10.1051/nss/2017038) (Cité p. 30).
- TIROLE, Jean et Christian GOLLIER (juin 2015). « Pour un accord efficace sur le climat ». Dans : *Le Monde*. URL : [https://www.lemonde.fr/economie/article/2015/06/05/pour-un-accord-efficace-sur-le-climat\\_4647453\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2015/06/05/pour-un-accord-efficace-sur-le-climat_4647453_3234.html) (visité le 20/08/2019) (Cité p. 124).
- TOL, Richard S. J. (2014). *Climate Economics : Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy*. OCLC : 891329147. Cheltenham : Elgar. ISBN : 978-1-78254-592-7 978-1-78254-591-0 978-1-78254-593-4 (Cité p. 124).
- (oct. 1997). « On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions : An Application of FUND ». Dans : *Environmental Modeling & Assessment* 2.3, p. 151-163. ISSN : 1573-2967. DOI : [10.1023/A:1019017529030](https://doi.org/10.1023/A:1019017529030) (Cité p. 66).
- TREMBATH, Alex, Jesse JENKINS, Ted NORDHAUS et Michael SHELLENBERGER (mai 2012). *Where the Shale Gas Revolution Came From ?* Rapp. tech. Break-through Institute Energy & Climate Program, p. 13 (Cité p. 50).
- TURNHEIM, Bruno, Frans BERKHOUT, Frank GEELS, Andries HOF, Andy McMEEKIN, Björn NYKVIST et Detlef VAN VUUREN (nov. 2015). « Evaluating Sustainability Transitions Pathways : Bridging Analytical Approaches to Address Governance Challenges ». Dans : *Global Environmental Change* 35, p. 239-253. ISSN : 09593780. DOI : [10.1016/j.gloenvcha.2015.08.010](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.010) (Cité p. 29).
- TURNHEIM, Bruno et Frank W. GEELS (nov. 2012). « Regime Destabilisation as the Flipside of Energy Transitions : Lessons from the History of the British Coal Industry (1913–1997) ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 35-49. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.04.060](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.060) (Cité p. 60).
- (déc. 2013). « The Destabilisation of Existing Regimes : Confronting a Multi-Dimensional Framework with a Case Study of the British Coal Industry (1913–1967) ». Dans : *Research Policy*. Economics, innovation and history : Perspectives in honour of Nick von Tunzelmann 42.10, p. 1749-1767. ISSN : 0048-7333. DOI : [10.1016/j.respol.2013.04.009](https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.04.009) (Cité p. 27, 60).
- TVINNEREIM, Endre (déc. 2014). « The Bears Are Right : Why Cap-and-Trade Yields Greater Emission Reductions than Expected, and What That Means for Climate Policy ». Dans : *Climatic Change* 127.3, p. 447-461. ISSN : 1573-1480. DOI : [10.1007/s10584-014-1282-1](https://doi.org/10.1007/s10584-014-1282-1) (Cité p. 138).
- TVINNEREIM, Endre et Michael MEHLING (oct. 2018). « Carbon Pricing and Deep Decarbonisation ». Dans : *Energy Policy* 121, p. 185-189. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2018.06.020](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.020) (Cité p. 125, 138, 140, 195).
- UFE (jan. 2018). *Le Système Électrique Du Futur*. Rapp. tech. Union Française de l'Électricité (Cité p. 72).

- UNRUH, Gregory C (oct. 2000). « Understanding Carbon Lock-In ». Dans : *Energy Policy* 28.12, p. 817-830. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7) (Cité p. 60, 183).
- VALÉRY, Paul (1919). « La Crise de l'esprit ». Dans : Paris : NRF, p. 321-337 (Cité p. 211).
- VAN SLUISVELD, Mariësse A. E., Andries F. HOF, Samuel CARRARA, Frank W. GEELS, Måns NILSSON, Karoline ROGGE, Bruno TURNHEIM et Detlef P. VAN VUUREN (mai 2018). « Aligning Integrated Assessment Modelling with Socio-Technical Transition Insights : An Application to Low-Carbon Energy Scenario Analysis in Europe ». Dans : *Technological Forecasting and Social Change*. ISSN : 0040-1625. DOI : [10.1016/j.techfore.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.024) (Cité p. 29).
- VERBONG, Geert et Frank GEELS (fév. 2007). « The Ongoing Energy Transition : Lessons from a Socio-Technical, Multi-Level Analysis of the Dutch Electricity System (1960–2004) ». Dans : *Energy Policy* 35.2, p. 1025-1037. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2006.02.010](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.010) (Cité p. 27, 206).
- VILLANI, Cédric (2010). « (Ir)Réversibilité et Entropie ». Dans : *Séminaire Poincaré XV*, p. 17-75 (Cité p. 213).
- VIRLOUVET, Gaël (avr. 2015). *Vingt ans de lutte contre le réchauffement climatique en France : bilan et perspectives des politiques publiques*. Les avis du Conseil Économique, Social et Environnemental 41115-0012. Paris : Conseil Économique, Social et Environnemental. ISBN : 978-2-11-138660-0 (Cité p. 78, 79, 80, 81, 85, 117, 120, 184).
- Voss, Jan-Peter et René KEMP (2006). « Sustainability and Reflexive Governance : Introduction ». Dans : *Reflexive Governance for Sustainable Development*. Sous la dir. de Jan-Peter Voss, Dierk BAUKNECHT et René KEMP. OCLC : 611725218. Cheltenham : Elgar, p. 3-28. ISBN : 978-1-84542-582-1 (Cité p. 23).
- WAKIM, Nabil (oct. 2018). « Le report de la baisse du nucléaire inquiète le secteur des énergies renouvelables ». Dans : *Le Monde*. URL : [https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/10/06/le-report-de-la-baisse-du-nucleaire-inquiete-le-secteur-des-energies-renouvelables\\_5365549\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/10/06/le-report-de-la-baisse-du-nucleaire-inquiete-le-secteur-des-energies-renouvelables_5365549_3234.html) (visité le 23/01/2019) (Cité p. 72, 185).
- WALKER, Gordon (mar. 2014). « The Dynamics of Energy Demand : Change, Rhythm and Synchronicity ». Dans : *Energy Research & Social Science* 1, p. 49-55. ISSN : 2214-6296. DOI : [10.1016/j.erss.2014.03.012](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.012) (Cité p. 21).
- WANG, Qiang, Xi CHEN, Awadhesh N. JHA et Howard ROGERS (fév. 2014). « Natural Gas from Shale Formation – The Evolution, Evidences and Challenges of Shale Gas Revolution in United States ». Dans : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, p. 1-28. ISSN : 1364-0321. DOI : [10.1016/j.rser.2013.08.065](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.065) (Cité p. 50).
- WARDE, P. (jan. 2006). « Fear of Wood Shortage and the Reality of the Woodland in Europe, c.1450-1850 ». Dans : *History Workshop Journal* 62.1, p. 28-57. ISSN : 1363-3554, 1477-4569. DOI : [10.1093/hwj/dbl009](https://doi.org/10.1093/hwj/dbl009) (Cité p. 42).
- WEITZMAN, M.L. (mar. 2014). « Can Negotiating a Uniform Carbon Price Help to Internalize the Global Warming Externality ? » Dans : *Journal of the*

- Association of Environmental and Resource Economists* 1.1-2, p. 29-49. ISSN : 2333-5955. DOI : [10.1086/676039](https://doi.org/10.1086/676039) (Cité p. 125).
- WEITZMAN, Martin L. (1974). « Prices vs. Quantities ». Dans : *The Review of Economic Studies* 41.4, p. 477-491. ISSN : 0034-6527. DOI : [10.2307/2296698](https://doi.org/10.2307/2296698) (Cité p. 124).
- WESTHOLM, Erik et Karin BELAND LINDAHL (nov. 2012). « The Nordic Welfare Model Providing Energy Transition? A Political Geography Approach to the EU RES Directive ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 328-335. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.07.027](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.027) (Cité p. 182).
- WIDOM, B. (déc. 1965). « Equation of State in the Neighborhood of the Critical Point ». Dans : *The Journal of Chemical Physics* 43.11, p. 3898-3905. ISSN : 0021-9606. DOI : [10.1063/1.1696618](https://doi.org/10.1063/1.1696618) (Cité p. 242).
- WILSON, Charlie (nov. 2012). « Up-Scaling, Formative Phases, and Learning in the Historical Diffusion of Energy Technologies ». Dans : *Energy Policy*. Special Section : Past and Prospective Energy Transitions - Insights from History 50, p. 81-94. ISSN : 0301-4215. DOI : [10.1016/j.enpol.2012.04.077](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.077) (Cité p. 54, 63).
- WILSON, Charlie et Arnulf GRUBLER (août 2011). « Lessons from the History of Technological Change for Clean Energy Scenarios and Policies ». Dans : *Natural Resources Forum* 35.3, p. 165-184. ISSN : 1477-8947. DOI : [10.1111/j.1477-8947.2011.01386.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01386.x) (Cité p. 37, 51, 53, 54, 55, 60, 61, 63).
- WILSON, Kenneth G. et J. KOGUT (août 1974). « The Renormalization Group and the  $\epsilon$  Expansion ». Dans : *Physics Reports* 12.2, p. 75-199. ISSN : 0370-1573. DOI : [10.1016/0370-1573\(74\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(74)90023-4) (Cité p. 242).
- WORLD BANK (avr. 1983). *The Energy Transition in Developing Countries*. Rapp. tech. 4442. The World Bank, p. 1. URL : <http://documents.worldbank.org/curated/en/905411468350188509/The-energy-transition-in-developing-countries> (visité le 04/06/2018) (Cité p. 10).
- WÖRLEN, Christine, Sarah RIESEBERG et Ramona LORENZ (sept. 2014). « A National Experiment without Evaluation or Monitoring and Evaluating the Energiewende? » Dans : *2014 International Energy Policy & Programme Evaluation Conference*. Berlin (Cité p. 103, 104).
- WRIGLEY, E. A. (août 2006). « The Transition to an Advanced Organic Economy : Half a Millennium of English Agriculture ». Dans : *The Economic History Review* 59.3, p. 435-480. ISSN : 1468-0289. DOI : [10.1111/j.1468-0289.2006.00350.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0289.2006.00350.x) (Cité p. 42, 46).
- (mar. 2013). « Energy and the English Industrial Revolution ». Dans : *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371.1986, p. 20110568. DOI : [10.1098/rsta.2011.0568](https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0568) (Cité p. 40, 42).
- XEXAKIS, Georgios et Evelina TRUTNEVYTE (sept. 2019). « Are Interactive Web-Tools for Environmental Scenario Visualization Worth the Effort? An Experimental Study on the Swiss Electricity Supply Scenarios 2035 ». Dans : *Environmental Modelling & Software* 119, p. 124-134. ISSN : 1364-8152. DOI : [10.1016/j.envsoft.2019.05.014](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.05.014) (Cité p. 31, 266).

- ZACCAI, Edwin (déc. 2015). « Chap. 7 Le développement durable malmené ». Dans : *Un demi-siècle d'environnement entre science, politique et prospective*. Editions Quæ. ISBN : 978-2-7592-2302-2. URL : [http://www.cairn.info/resume.php?ID\\_ARTICLE=QUAE\\_BARRE\\_2015\\_01\\_0119](http://www.cairn.info/resume.php?ID_ARTICLE=QUAE_BARRE_2015_01_0119) (visité le 16/01/2017) (Cité p. 11).
- ZEP (juil. 2011). *The Costs of CO<sub>2</sub> Capture*. Rapp. tech. Brussels, Belgium : Zero emissions platform, European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. URL : <https://www.zeroemissionsplatform.eu/library/publication/166-zep-cost-report-capture.html> (Cité p. 293).

#### COLOPHON

This document was typeset using the typographical look-and-feel `classicthesis` developed by André Miede and Ivo Pletikosić. The style was inspired by Robert Bringhurst’s seminal book on typography “*The Elements of Typographic Style*”. `classicthesis` is available for both  $\text{\LaTeX}$  and  $\text{\LyX}$  :

<https://bitbucket.org/amiede/classicthesis/>

*Version finale* du 3 février 2020 (`classicthesis` v4.6).



## RÉSUMÉ

---

Pour lutter contre le changement climatique et limiter l'élévation des températures, les pays doivent diminuer leurs émissions CO<sub>2</sub> et réaliser ce qu'on appelle communément une *transition énergétique*. Or, ce terme reste ambigu pour comprendre les enjeux associés à la transformation du système énergétique puisqu'il recouvre différents objectifs qui rendent sa gestion d'autant plus compliquée. Le but de cette thèse est donc d'interroger ce terme de *transition énergétique* afin de proposer une nouvelle approche de son pilotage. Premièrement, un état des lieux du concept de *transition énergétique* est dressé en revenant d'une part sur sa définition, qui s'avère éminemment ambiguë, et d'autre part sur les observations du passé, qui nous montrent qu'un pilotage effectif de la *transition énergétique bas-carbone* sera nécessaire. Dans une deuxième partie, les tentatives contemporaines de pilotage sont analysées dans le cas de la France. On retrace tout d'abord les politiques mises en place jusqu'à aujourd'hui en montrant que le système énergétique français n'a pas réellement engagé une *transition énergétique* correspondant aux objectifs affichés. En s'appuyant sur un modèle de prospective énergétique, le modèle TIMES-France, on examine ensuite les implications d'un objectif de neutralité carbone sur : le niveau de taxe carbone, trop élevé pour être acceptable politiquement et socialement ; les trajectoires de décarbonation, impliquant un bouleversement technologique complet du système énergétique ; et enfin les enjeux spécifiques au cas français grâce à une comparaison avec la situation suédoise. Enfin, dans une dernière partie, de nouvelles approches du pilotage de la *transition énergétique* sont explorées. Après être revenus sur une proposition d'un courant des sciences sociales, le *Transition Management*, une analogie entre la *transition énergétique* et la théorie de la transition de phase en physique est développée dans le but d'améliorer le pilotage de la *transition énergétique* et d'enrichir la compréhension de cette notion. Elle nous permet de proposer un ensemble de taxes et subventions évoluant dans le temps.

## MOTS CLÉS

---

Transition énergétique bas-carbone, France, prospective, modélisation énergétique, pilotage, transition de phase.

## ABSTRACT

---

To fight climate change and limit the rise in global temperatures, countries must reduce their CO<sub>2</sub> emissions and achieve what is commonly known as an *energy transition*. However, this ambiguous notion covers various objectives, which makes it difficult to understand the challenges involved in transforming the energy system and further complicates its management. The aim of this thesis is to question the term of *energy transition* in order to propose a new approach to its management. We begin with an overview of the concept of *energy transition*, which involves both looking at its highly ambiguous definition and observing it throughout history, which indicates that the *low-carbon energy transition* will need to be handled very differently from in the past. In the second part, we analyze French attempts to steer the transition. Our examination of policies implemented to date shows that the French energy system has not really engaged in an *energy transition* that corresponds to the stated objectives. Based on the TIMES-France energy prospective model we then examine the impact of a carbon neutrality target on: the level of carbon tax, which will be too high to be acceptable politically and socially; decarbonization trajectories, which will involve a radical technological change of the energy system; and specific challenges facing France thanks to a comparison with the Swedish situation. In the last part, we explore new approaches to piloting the *energy transition*. Following a review of a proposal from a branch of the social sciences, *Transition Management*, we develop an analogy between the *energy transition* and the phase transition theory in physics, with the aim of improving control of the *energy transition* and enriching our understanding of this notion. More specifically, it allows us to put forward a set of taxes and subsidies evolving over time.

## KEYWORDS

---

Low-carbon energy transition, France, prospective, energy modelling, steering, phase transition