

Université de Montréal

**Peut-on accomplir la transition énergétique sans
décroissance économique?**

par Sarah Cacoub

Science de la gestion
HEC Montréal

Mémoire présenté
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en science
en gestion en contexte d'innovations sociales

août, 2017

© Sarah Cacoub, 2017

Résumé

Les inquiétudes de notre temps face à un contexte de réchauffement climatique et d'épuisement des ressources énergétiques, tous deux établis depuis 40 ans, nous forcent à nous questionner sur la pertinence des actions entreprises par les parties prenantes consacrées à ces enjeux. Ce mémoire cherche à démontrer qu'on ne peut accomplir la transition énergétique telle que définie par les grandes organisations ou par les grandes puissances mondiales, qui sont en même temps les plus grands pollueurs, sans décroissance économique. Nous exposons pour cela les limites physiques aux stratégies de transition, dont deux en particulier – la recherche de l'efficacité et la substitution des énergies fossiles par les énergies renouvelables – sont analysées plus en détail. La thèse principale que nous soutenons est la suivante : le progrès technique n'est pas la solution à une possible croissance infinie car il entretient une relation de complémentarité avec un capital de nature non renouvelable dans lequel on voit des signes d'épuisement. De ce fait, nous avons voulu vérifier grâce à l'étude d'un plan de transition énergétique bien établi, l'Energiewende allemand, la pertinence de notre thèse.

Mots-clés : réchauffement climatique, transition énergétique, décroissance économique, progrès technique, efficacité énergétique, énergies fossiles, énergies renouvelables, économie écologique, thermodynamique, Energiewende

Abstract

The worries of our day and age, in the context of global warming and of depleting energy resources, both established in the past 40 years, force us to question the relevance of the actions undertaken by the stakeholders devoted to these issues. This paper seeks to demonstrate that it is impossible to accomplish the energy transition as it is defined by the major organizations or by the great world powers, the latter also being the largest world polluters, without economic degrowth. To this end, we expose the physical limitations of transition strategies, two of which are analyzed in more detail herein: the search for energy efficiency and the substitution of fossil fuels by renewable energies. The main thesis that we support is that technical progress is not the solution to possible infinite growth because it maintains a complementary relationship with a capital of a non-renewable nature in which we see signs of exhaustion. We therefore want to verify the relevance of our thesis by studying a well-established energy transition plan, the German Energiewende.

Keywords: global warming, energy transition, economic degrowth, technical progress, energy efficiency, fossil fuels, renewable energies, ecological economics, thermodynamics, Energiewende

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des sigles.....	xiii
Remerciements.....	xvi
Introduction.....	1
Chapitre 1. Qu'est-ce que la transition énergétique?.....	13
1.1 Qu'est-ce que l'énergie?.....	13
1.1.1 L'énergie est une force de travail.....	13
1.1.2 Les deux lois de la thermodynamique.....	14
1.1.3 Quelle énergie mobilisons-nous?.....	18
1.1.4 Comment comparer les énergies entre elles?.....	29
1.2 Quels problèmes posent nos systèmes énergétiques?.....	39
1.2.1 Épuisement des énergies non renouvelables.....	39
1.2.2 Gaz à effet de serre et dérèglement climatique.....	48
1.3 En quoi consiste la transition?.....	61
1.3.1 Définition.....	61
1.3.2 Le pari d'un découplage croissance économique/impact écologique?.....	64
1.3.3 Substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables.....	82
1.3.4 Efficacité énergétique.....	88
1.3.5 Stratégies pour favoriser ces deux phénomènes.....	93

1.4	Conclusion du chapitre 1	94
Chapitre 2.	Quels sont les principaux défis que pose la transition?	96
2.1	Objections théoriques à la théorie économique de la croissance	97
2.1.1	La théorie économique de la croissance néglige les lois de la thermodynamique	97
2.1.2	Effets rebond ou paradoxe de Jevons : la dynamique économique de nos sociétés tend à annuler les économies d'énergie-matière permises par le progrès technique	106
2.2	Objections empiriques à la théorie économique de la croissance	110
2.2.1	Indices possibles des limites au progrès technique	111
2.2.2	Pas de croissance économique sans croissance de la consommation d'énergie .	114
2.2.3	Conclusion	126
2.3	Limites des énergies renouvelables	128
2.3.1	Introduction.....	128
2.3.2	La densité énergétique des énergies renouvelables inférieure à celles des fossiles	130
2.3.3	Des énergies difficilement contrôlables.....	132
2.3.4	Limites théoriques à l'amélioration de l'efficacité énergétique des énergies renouvelables	141
2.3.5	Coût énergétique des énergies renouvelables	144
2.3.6	Le risque du cannibalisme énergétique.....	152
2.3.7	Et l'énergie nucléaire?	159
2.3.8	Conclusion du paragraphe 2.3.....	161
2.4	Conclusion du chapitre 2	162
Chapitre 3.	L'Energiewende comme terrain d'analyse	166
3.1	Brève histoire de l'Energiewende.....	166
3.2	Objectifs du projet.....	168
3.3	Moyens mis en œuvre	178
3.3.1	Les lois au centre de la politique énergétique allemande	179
3.3.2	Comment mettre en œuvre le déploiement des renouvelables?.....	184
3.3.3	Comment rendre le système énergétique plus efficace?	187

3.3.4	Avantages économiques espérés du plan de transition	194
3.4	Premiers résultats de l'Énergiewende	199
3.4.1	L'économie allemande depuis le lancement de l'« Energiewende ».....	199
3.4.2	La situation énergétique allemande actuelle (2014, 2015 et 2016)	204
3.4.3	Quelle évolution de la consommation/production d'énergie depuis le lancement de l'« Energiewende »?.....	217
3.4.4	Diminution des GES	229
3.4.5	Conclusion	233
3.5	Discussion.....	241
3.5.1	La croissance économique s'appuie sur une croissance de la consommation énergétique.....	244
3.5.2	La dématérialisation de l'économie est-elle un leurre?	247
3.5.3	Efficacité énergétique	250
3.5.4	Les renouvelables sont complémentaires aux fossiles.....	261
3.5.5	Interprétation socio-politique des limites du plan allemand sur la recherche de l'efficacité	269
Synthèse	.....	277
Apports du mémoire	.....	289
Limites de l'étude	.....	291
Prolongements éventuels, questions restant à traiter	.....	292
Bibliographie	.....	299
Annexe : EROI	.....	i

Liste des tableaux

Tableau I.	Unités, symboles et définition des énergies utilisées.....	31
Tableau II.	Pouvoir calorifique des combustibles fossiles en MJ/kg.....	33
Tableau III.	Pouvoir calorifique de quelques sources de biomasse en MJ/kg.....	33
Tableau IV.	Évolution de l'EROI du secteur pétrolier et gazier aux U.S.A, en 1930, 1970 et 2005	43
Tableau V.	Durée de séjour et PRG des principaux gaz à effet de serre.....	52
Tableau VI.	Coefficient d'émission des principales sources d'énergies fossiles.....	53
Tableau VII.	Objectifs de Réduction des GES selon le RCP 2,6.....	59
Tableau VIII.	EROI des énergies fossiles et de quelques énergies renouvelables	150
Tableau IX.	Tableau Récapitulatif des limites et des risques associés à la substitution des fossiles par les renouvelables.....	161
Tableau X.	Chiffres tirés du Scénario 2011, A.....	174
Tableau XI.	Objectif d'augmenter la productivité énergétique de 2,1% / an entre 2008 et 2050	175
Tableau XII.	Objectifs établis dans le cinquième rapport de suivi de la transition énergétique par le BMWI.....	177
Tableau XIII.	Couloir de déploiement des capacités installées des renouvelables	185
Tableau XIV.	Classement de la consommation énergétique allemande dans le monde [Mtoe], Source : Enerdata, 2017.....	204
Tableau XV.	L'Allemagne classée au 31 ^{ème} rang mondial de la consommation d'énergie per capita [ktoe/population], en 2013.	205
Tableau XVI.	Classement mondial des plus grands producteurs de lignite et de houille [Mt] en 2016	210
Tableau XVII.	Consommation d'énergie finale (FEC) en Mtoe, de 1990 à 2014.....	219
Tableau XVIII.	Tableau récapitulatif des taux de croissance et des objectifs 2020.....	228

Tableau XIX.	Tableau récapitulatif des résultats d'avancement et des objectifs.....	Error!
Bookmark not defined.		
Tableau XX.	Evolution de la consommation énergétique dans le secteur des transports	259
Tableau XXI.	Production d'électricité des éoliens et du solaire le 5 décembre 2016 en Allemagne	263

Liste des figures

Figure 1.	Part des émissions de GES anthropiques « pour les 42 pays de l'Annexe 1 » du rapport de l'AIE	3
Figure 2.	Évolution des émissions de CO ₂ issues de la combustion des énergies fossiles	4
Figure 3.	Évolution de la concentration atmosphérique de CO ₂ depuis 1950 jusqu'à 2010 .	7
Figure 4.	Evolution des émissions CO _{2eq} jusqu'en 2014 et projection d'émission sans croissance de la production en énergie fossile	10
Figure 5.	Chaîne de valeur énergétique simplifiée	22
Figure 6.	Consommation énergétique primaire par secteur et par source, aux U.S.A, en 2016	23
Figure 7.	Processus de transformation des énergies renouvelables en énergies utilisables .	23
Figure 8.	Part des énergies primaires dans le TPES mondial en 2014,	25
Figure 9.	Evolution de la part des énergies dans la consommation finale dans le monde, en 1973 et en 2014.....	26
Figure 10.	Flux énergétique au Québec en 2013	28
Figure 11.	Calcul de l'EROI du pétrole en tenant compte des différentes frontières de calcul	36
Figure 12.	Un exemple de frontière de calcul d'EROI	37
Figure 13.	Production pétrolière qui serait observée sans nouvel investissement	40
Figure 14.	Production et découverte annuelle de pétrole, en millions de barils, 1930-2050 .	41
Figure 15.	Evolution décroissante de l'EROI du pétrole et du gaz entre 1989 et 2010	43
Figure 16.	Extrapolation de la production de pétrole selon une ressource ultime renouvelable de 3200 Gb (milliards de barils).....	46
Figure 17.	EROI des différentes sources d'énergies fossiles	47
Figure 18.	Principe de la production de GES schématisé	50
Figure 19.	Taux d'émission de gaz à effet de serre (kt.eq.CO ₂ /TWh) produit	54

Figure 20.	Tableau, Différents scénarios calculés par le GIEC selon le taux de GES.....	57
Figure 21.	Schéma explicatif de découplage absolu et relatif.....	71
Figure 22.	Découplage relatif entre les émissions de CO ₂ et la croissance économique à l'échelle mondiale	72
Figure 23.	Part de l'éolien dans la production mondiale de l'électricité en 2013	83
Figure 24.	Exemple de substitution pour la chaleur et le transport.....	87
Figure 25.	Efficacité énergétique d'une ampoule	90
Figure 26.	Estimée de réduction de la consommation d'énergie [PJ] par secteur entre 2000 et 2013, en Allemagne	91
Figure 27.	Intensité énergétique entre 1990 et 2015 dans le monde	92
Figure 28.	Intrants et extrants du système productif. Source : Jancovici, 2015.....	101
Figure 29.	Stagnation de l'efficacité des véhicules à essence	111
Figure 30.	Evolution de l'intensité énergétique finale dans l'Union Européenne, entre 1990 et 2012	112
Figure 31.	Economie d'énergie estimée grâce à l'efficacité énergétique dans le monde..	113
Figure 32.	Un millénaire de croissance mondiale	116
Figure 33.	Evolution des proportions des ressources énergétiques utilisées durant les deux derniers siècles, entre 1860 et 2000	117
Figure 34.	Consommation d'énergie et revenu 2004 dans le monde	120
Figure 35.	Consommation d'énergie et PIB mondiale de 1965 à 2016	121
Figure 36.	PIB [milliards de dollars] par rapport à la consommation d'énergie [Mtoe] ..	122
Figure 37.	Graphique présentant les courbes de consommation de l'énergie et d'évolution du PIB depuis le début des années 1960.....	123
Figure 38.	Différents modes de stockage	139
Figure 39.	Limite de Betz pour les éoliennes.....	142
Figure 40.	Rendement énergétique de la CSP par m ² en fonction du gradient de température	143
Figure 41.	LCOE [dollars/kWh] des différentes sources d'énergie.....	145

Figure 42.	L'évolution de l'offre d'énergie primaire pour fournir 2000 W de puissance nette moyenne par habitant d'ici 2100 à une population de 10,8 milliards	158
Figure 43.	Objectif de réduction GES de 40% entre 1990 et 2020	170
Figure 44.	Objectif d'augmentation des renouvelables avec réduction de la consommation énergétique jusqu'en 2050.....	171
Figure 45.	Objectifs de développement de la part des renouvelables dans le secteur de l'électricité et dans la consommation finale	172
Figure 46.	Objectif de réduction de la consommation d'énergie primaire (TPES) de 20% d'ici 2020	173
Figure 47.	Quatre objectifs de la transition énergétique	178
Figure 48.	Diagramme d'écoulement d'énergie [PJ] en 2014.....	189
Figure 49.	Couplage sectoriel.....	192
Figure 50.	Prévision des coûts de production jusqu'en 2030	197
Figure 51.	Les énergies renouvelables créent plus d'emploi que le charbon.	198
Figure 52.	Taux de croissance économique annuel [%], entre 1990 et 2017.....	200
Figure 53.	Croissance de la balance commerciale [milliards d'euro], entre 1990 et 2017	202
Figure 54.	Croissance du rapport PIB / unité d'énergie utilisée [\$ /kg équivalent pétrole]	203
Figure 55.	Flux énergétique allemand en 2015	206
Figure 56.	Système de transformation énergétique allemand en 2015.....	207
Figure 57.	Part des énergies dans le TPES en 2016	208
Figure 58.	Part des énergies dans la production d'électricité allemande en 2016	211
Figure 59.	Principaux gazoducs acheminant le gaz russe	213
Figure 60.	Consommation d'énergie en Allemagne entre 1990 et 2016	218
Figure 61.	Diminution de la capacité installée de production d'électricité par le nucléaire...	220
Figure 62.	Évolution de la consommation de charbon [Mt] en Allemagne entre 1990 et	

Figure 63.	Évolution de la capacité installée des centrales à houilles pour la production d'électricité. Source : Fraunhofer, 2017	222
Figure 64.	Approvisionnement de pétrole brut en Allemagne de 1990 à 2016.....	223
Figure 65.	Part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale	224
Figure 66.	Evolution de la part [%] des renouvelables dans la production d'électricité entre 1990 et 2016	225
Figure 67.	Capacité installée des renouvelables.....	226
Figure 68.	L'Allemagne classée 32ème au rang mondiale des émetteurs GES/capita	230
Figure 69.	Evolution des émissions GES en Allemagne par secteur entre 1990 et 2016	232
Figure 70.	Evolution des émissions CO _{2eq} en Allemagne entre 1990 et 2016	233
Figure 71.	Etat d'avancement et objectifs à atteindre	234
Figure 72.	La diminution de la consommation d'énergie primaire n'est pas suffisante par rapport aux objectifs de l'Energiewende	236
Figure 73.	Evolution des capacités installées des énergies mobilisées en Allemagne.	
Figure 74.	Evolution du PIB, de l'énergie primaire et des GES depuis 1990.	239
Figure 75.	Evolution de l'exportation en électricité	Error! Bookmark not defined.
Figure 76.	Part croissante des importations dans le PIB allemand	Error! Bookmark not defined.
Figure 77.	Intensité énergétique en Allemagne.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 78.	Mesure des progrès réalisés en Allemagne en matière d'efficacité énergétique (courbe ODEX) entre 2000 et 2013	Error! Bookmark not defined.
Figure 79.	Mesure des progrès réalisés en Allemagne en matière d'efficacité énergétique (courbe ODEX) entre 1991 et 2008	Error! Bookmark not defined.
Figure 80.	Stagnation des progrès en efficacité énergétique dans le secteur industriel allemand	Error! Bookmark not defined.
Figure 81.	L'intensité énergétique diminue	Error! Bookmark not defined.
Figure 82.	Evolution de l'énergie utilisée dans le secteur des transports en Allemagne (courbe bleue)	258
Figure 83.	Type d'énergie consommé le 5 décembre 2016	262

Figure 84.	Evolution des capacités installées de houille, lignite et d'uranium	266
Figure 85.	Pic de production du charbon correspondant aux périodes de fermeture des centrales nucléaires	267
Figure 86.	Classement des moyens de transports les plus efficaces (Source : Gordon, 2014)	294

Liste des sigles

AIE	Agence internationale de l'énergie (IEA est l'acronyme anglais)
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
BMWI	Ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie
BPJ	Barils par jour (ou Barrels per day (bpd))
CC	Changements climatiques
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de Carbone
CO _{2eq}	CO ₂ équivalent
EIA	Energy Information Administration
EF	Énergie fossile
Energiewende	Plan de transition énergétique allemand
EJ	Exa Joules = 10 ¹⁸ Joules
ER	Énergie renouvelable
FR	Forçage radiatif
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GW	Gigawatt
GWh	Giga Wattheure
IPCC	GIEC
Mddelcc	Ministère du développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques
Mtoe	Millions tonnes équivalent pétrole = 10 ⁶ tonnes équivalent pétrole
NM	Newton mètre pour le travail mécanique
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
ODEX	Indice d'efficacité énergétique selon la demande
ODD	Objectifs de développement durable
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement

PJ	PétaJoules
Tep	tonne équivalent pétrole
URR	ressource ultime récupérable
Tep	tonne équivalent pétrole
URR	ressource ultime récupérable
W	Watt
WBCSD	Conseil mondial des entreprises pour le développement durable
Wh	Wattheure

« Le moment depuis longtemps prévu est arrivé, où le capitalisme est sur le point de voir son développement arrêté par des limites infranchissables. De quelque manière que l'on interprète le phénomène de l'accumulation, il est clair que le capitalisme signifie essentiellement expansion économique et que l'expansion capitaliste n'est plus loin du moment où elle se heurtera aux limites mêmes de la surface terrestre. »

Simone Weil, août 1933

Remerciements

Merci est un mot si précieux à prononcer. Il signifie que des gens sont là pour nous, mais aussi que nous ne pouvons pas accomplir grand-chose à nous seuls. C'est très certainement le cas pour la rédaction de ce mémoire et la brièveté de mes remerciements ici est inversement proportionnelle à l'importance que vous avez tenue dans son aboutissement.

À mes collègues de classe et amis, vous avez alimenté les débats et mes questionnements au fil des cours, recherches, conférences, voyages et même des partys que nous avons vécus ensemble. Merci.

À mes professeurs, vous m'avez aidée à façonner ma pensée et à diriger mon implication et mes combats, présents et futurs. Pour cela merci.

À mon directeur de mémoire, cher Yves-Marie Abraham, ta passion, ton appui indéfectible et ta disponibilité pour tout dire exceptionnelle, malgré vents et marées, m'ont propulsée non seulement vers la complétion de ce mémoire, mais vers une vie transformée car à jamais conscientisée aux vrais enjeux qui nous concernent tous et chacun. Pour avoir fait ta part dans cette petite révolution personnelle, je te dis merci.

Enfin, venons-en à l'essentiel. À quoi bon se battre pour respirer un air pur, comme je m'engage à le faire, si cet air n'est pas rempli d'amour. Je suis si chanceuse d'aimer et d'être aimée. En plus de ce précieux merci, donc, je vous dis que je vous aime, maman et papa. Vous êtes les plus gentils du monde et je vous dois absolument tout, chaque lettre de ce mémoire, chaque inspiration, chaque émerveillement et cette jeune vie m'en a déjà tant offerts. J'arrête car cet amour je vous l'écrirais pendant 300 autres pages et ce mémoire est déjà un peu (trop) long. À ma famille, ma sœur, mes frères. Je vous aime. À mes amis les plus proches, vous savez le véritable amour que j'éprouve pour vous. Et à mon amoureux, je te le crie avec passion, comme il m'est arrivé de crier parfois, surtout ces derniers mois... JE T'AIME!!!

Introduction

« Les problèmes significatifs que nous avons à résoudre, ne peuvent pas l'être en restant au même niveau de pensée qui était celui dans lequel ils ont été posés. »

Albert Einstein

Les changements climatiques (CC) sont un phénomène mondial. Ils sont reconnus en 1988 lorsque James Hansen, alors directeur du GISS, l'Institut Goddard des études spatiales du laboratoire de science climatique de la NASA, révèle une hausse de température de « 0,4°C par rapport à la période 1951-1980 » (Lorck, 2017)¹, variation inhabituelle depuis les premières mesures instrumentales en 1880 (Lorck, 2017). En juin 1992, 4 ans après sa création, le GIEC², Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat de

¹ Lorck, J. (2017). *L'année 2016 au-dessus de la prévision centrale des modèles du GIEC. global-climat*. Consulté 2 août 2017, à l'adresse <https://global-climat.com/2017/02/08/annee-2016-au-dessus-de-la-prevision-centrale-des-modeles-du-giec/>

² Le GIEC est, en français, l'acronyme du « Groupe Intergouvernemental sur le Réchauffement du Climat ». En anglais, il se nomme IPCC, acronyme d' « Intergovernmental Panel on Climate Change ». Il a été créé dans le but d'étudier le RC.

« Le GIEC, qui est sans doute la plus grande autorité scientifique mondiale en matière de changements climatiques, a pour mandat « d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation » (*L'activité humaine et l'environnement : statistiques annuelles : Section 1 : Changements climatiques au Canada*. (2017). *Statcan.gc.ca*. Consulté 2 août 2017, à l'adresse <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm>)

Le GIEC a entre autre reçu le Prix Nobel de la paix en 2007 pour sa contribution dans le domaine des changements climatiques

l'OMM, l'Organisation météorologique mondiale et du PNUE, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, publiait son premier rapport intitulé *Changement climatique : les évaluations du GIEC de 1990 à 1992* (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 1992)³.

Le groupe de travail I⁴ de cette étude y révèle la cause des changements climatiques⁵. Ils seraient dus à un déséquilibre profond du cycle du carbone naturel, attribué à l'accumulation trop importante d'une forme particulière de gaz dans l'atmosphère : les gaz à effet de serre (GES). Ceux-ci sont présents naturellement dans l'atmosphère et en partie imputables aux activités humaines (IPCC, 1992). Dans leur cinquième et dernier rapport⁶ *Climate*

³https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/French/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_fr.pdf

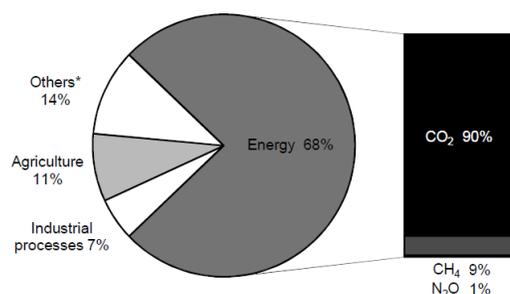
⁴ Les aspects scientifiques du changement climatique sont rédigés par le Groupe de travail I du GIEC chargé précisément de ces aspects scientifiques. Les incidences potentielles du changement climatique sont présentées en 1990 par le Groupe de travail II du GIEC et les stratégies d'adaptation au changement climatique sont quant à elles mises de l'avant par le Groupe de travail III du GIEC (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2017). http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)

⁵ Le GIEC parle de changement climatique, et non de réchauffement climatique, car ce dernier est vrai à l'échelle mondiale, mais peut-être faux à l'échelle locale (un pays peut très bien connaître des températures plus froides dues aux CC).

⁶ En 2014, le GIEC a publié un rapport scientifique complet et un résumé à l'attention des décideurs qui servira de support pour les négociations de la 22^{ème} Conférence des Parties à Paris en 2015 : « La publication de ce rapport tombe à point nommé car, grâce à des éléments scientifiques clairs et irréfutables, ces informations donneront un nouvel élan aux négociateurs chargés de conclure, en 2015, un nouvel accord au titre de la CCNUCC, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques » dit Jarraud, secrétaire général de l'OMM et Steiner, directeur exécutif du PNUE (Rapport du Groupe de travail I du GIEC. (2013). *Changements Climatiques 2013 - Les éléments scientifiques* (p.v4 :204). OMM/PNUE. Consulté à l'adresse http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf). Par ailleurs, un sixième rapport est en cours de rédaction. Il fera office de « premier bilan mondial prévu au titre de la CCNUCC » en 2022 (IPCC -

Change 2013 le GIEC affirme qu'« **il est extrêmement probable** que l'influence de l'homme soit la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle » (IPCC, 2013, 17:204). En 2015, le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) est formel : **le secteur énergétique⁷ est responsable à 68% des émissions de GES anthropiques**, dont 90% de ces GES seraient du CO₂ issu de la combustion des énergies fossiles :

Figure 1. Shares of global anthropogenic GHG, 2010*



* Others include large-scale biomass burning, post-burn decay, peat decay, indirect N₂O emissions from non-agricultural emissions of NO_x and NH₃, Waste, and Solvent Use.

Source: IEA estimates for CO₂ from fuel combustion and EDGAR 4.3.0/4.2 FT2010 for all other sources, (see Part III).

Figure 1. Part des émissions de GES anthropiques « pour les 42 pays de l'Annexe 1 » du rapport de l'AIE

Source: IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2015, OECD/IEA, Paris, 2015: xiii

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2017). Ipcc.ch. Consulté 3 août 2017, à l'adresse http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml).

⁷ *“The energy sector includes emissions from —**fuel combustion**” (the large majority) and —**fugitive emissions**”, which are intentional or unintentional releases of gases resulting from production, processes, transmission, storage and use of fuels (e.g. CH₄ emissions from coal mining).”* (Agence Internationale de l'Energie. (2015). *CO₂ Emissions From Fuel Combustion* (p. xiii : 548). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>

Par ailleurs, les émissions mondiales de CO₂ n'ont cessé d'augmenter et d'accélérer depuis l'époque industrielle. Ces dernières ont connu une hausse de près de 40% depuis 1990 et cette augmentation évolue de manière exponentielle :

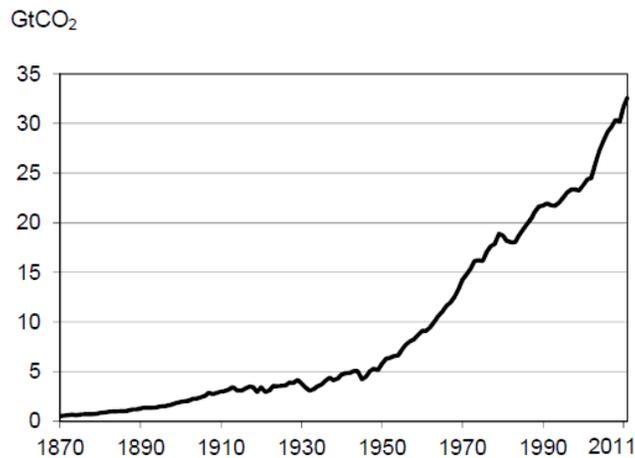


Figure 2. Évolution des émissions de CO₂ issues de la combustion des énergies fossiles

Source: IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion, OECD/IEA, Paris, 2015: xiv

Le groupe de travail II du GIEC révèle quant à lui les incidences potentielles liées aux CC sur l'équilibre écologique de la planète⁸. Son accélération depuis les 30-40 dernières années contribue au caractère exponentiel de l'emballement, c'est-à-dire l'effet d'amplifier la vitesse et le nombre de phénomènes écologiques inter-reliés tels que les tempêtes, les inondations et les périodes de sécheresse. De ce constat, il est possible de prévoir que « ces changements profiteront à certaines espèces alors que d'autres, incapables de migrer ou de s'adapter assez rapidement, s'éteindront » (IPCC, 1992 :129).

⁸ Les CC viennent perturber la température (IPCC, 2013 :20), le cycle de l'eau (IPCC, 2013 :20), la qualité de l'air, (IPCC, 2013 :21), les océans (IPCC, 2013 :20), la cryosphère (IPCC, 2013 :24), l'élévation du niveau des mers (IPCC, 2013 :25), le cycle du carbone et les autres cycles biochimiques (IPCC, 2013 :26).

Outre les bouleversements climatiques qui ne composent rien de moins que l'une des plus grandes menaces de notre civilisation, « l'âge des carburants fossiles abondants et peu chers tire à sa fin » (Greer, 2013 : 142)⁹. Les énergies fossiles sont en fait des ressources non renouvelables, à l'échelle humaine, dont on voit depuis quelques décennies les premiers signes d'épuisement. Comme le souligne Greer, « les sources d'énergie hautement concentrées sont très rares et n'apparaissent que dans des conditions exceptionnelles » (2013 : 127). L'abondance de l'énergie fossile est en fait relative et donne lieu à des débats. En effet, certains chercheurs estiment que les quantités des ressources énergétiques fossiles **disponibles** sont encore immenses et pourront répondre à la demande pour de nombreux siècles encore. Pour d'autres, l'enjeu ne réside pas dans les stocks disponibles, mais dans leur **accessibilité**. Pour eux, nous serions en train de vivre une crise énergétique causée par le point de bascule selon lequel il serait de plus en plus coûteux d'aller puiser nos ressources énergétiques. Cette **tension entre la disponibilité des ressources et leur accessibilité** a été pressentie par Stanley Jevons dès le milieu du XIX^{ème} siècle : « à force de devoir creuser toujours plus profond et dans des conditions toujours plus difficiles, nous finirons par atteindre cette limite floue mais inévitable où il ne nous sera plus possible de progresser » (Stanley Jevons cité par Abraham, Y. et M. David, 2015 : 205)¹⁰. Enfin, certains poussent la réflexion en soutenant qu'à notre rythme de consommation croissant, les ressources non renouvelables, incluant les métaux, ne pourront, dans quelques années, répondre à la demande.

La transition énergétique est-elle possible sans décroissance?

L'accélération de notre consommation des flux d'énergie carbonée dont nous dépendons depuis l'ère industrielle pose donc deux problèmes de base : 1) elles produisent des gaz à effet

⁹ Greer, J. (2013). *La fin de l'abondance* (1st éd., p.142, 236 pages). Montréal: Ecosociété.

¹⁰ Abraham, Y., & David, M. (2015). *"Faire l'économie de la nature", Creuser jusqu'où? Extractivisme et limites à la croissance* (1st éd., p. 205, 384 pages). Montréal: Ecosociété.

de serre et 2) elles sont non renouvelables. De ces deux constats, il semblerait que la réduction de notre consommation d'énergies fossiles, par force ou par conviction, soit inéluctable.

D'où l'idée sinon la nécessité prégnante de transition visant à réduire rapidement notre consommation de combustibles fossiles, en misant notamment sur l'efficacité énergétique, tout en prenant appui sur d'autres sources d'énergie.

En elle-même, la transition énergétique ne pose pas de problème. La question est de savoir quel en est **son coût pour les humains**. Peut-elle se faire sans dégrader leurs conditions d'existence? Peut-elle se faire sans remettre en question nos capacités de production, qui dépendent fondamentalement de notre capacité à mobiliser de l'énergie? Le discours dominant des dirigeants et experts laisse entendre qu'une telle chose est possible. Pour le monde scientifique, dont le groupe de travail III du GIEC (celui-là même qui étudie les stratégies d'adaptation aux CC), la transition énergétique est possible sans coût pour les humains. Pour le GIEC, il est impératif de ne pas dépasser le seuil d'augmentation de température de **+2°C d'ici 2100** pour maintenir les conditions de vie sur Terre que nous connaissons aujourd'hui. Ce plafond se traduit par une limitation de la concentration moyenne de GES dans l'atmosphère à **450 ppmCO₂eq**¹¹. Or, en juin 2017 nous atteignons 408,84 ppm (CO₂earth, 2017)¹² :

¹¹ Parties par millions en équivalent CO₂

¹² CO₂.Earth. (2017). *Earth's CO₂ Home Page*. CO2.Earth. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://www.co2.earth/>

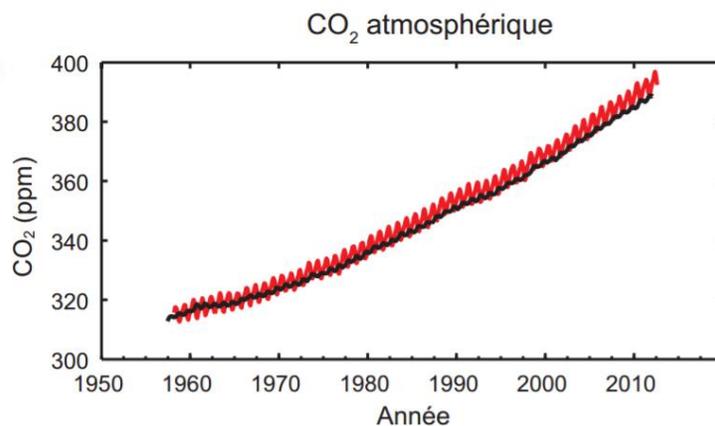


Figure 3. Évolution de la concentration atmosphérique de CO₂ depuis 1950 jusqu'à 2010

Source : IPCC, 2013 : 12

D'après le groupe de travail III, il faudrait « réduire immédiatement de plus de 60% les émissions anthropiques de gaz à longue durée de vie afin de stabiliser leurs concentrations au niveau actuel » (1992 : 129). En d'autres termes, « cela voudrait dire ne plus utiliser la moindre source d'énergie fossile dont les émissions ne seraient pas captées et stockées, ou alors compensées » (Villeneuve, 2016)¹³, en plus de ne consommer des quantités d'énergie que les écosystèmes sont capables de régénérer.

« Ces objectifs peuvent paraître ambitieux, mais les conséquences qui en résultent exigent que le monde industrialisé agisse plus rapidement. Si l'on veut respecter le « budget carbone » de 450 ppm, l'atmosphère ne peut absorber plus de 1 230 milliards de tonnes de gaz à effet de serre. **En 2014, les émissions de ces gaz piégeant la chaleur s'élevaient à environ 50 milliards de**

¹³ Villeneuve, C. (2014). *Une cible inatteignable*. Le Devoir. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/419592/une-cible-inatteignable>

tonnes. À ce rythme, le budget carbone de 450 ppm sera utilisé dans seulement 25 ans » (Morris, G. et M. Penht, 2015 :11)¹⁴.

Ainsi, malgré le niveau inquiétant de GES actuel qui préfigure des changements climatiques inévitables (Organisation de coopération et de développement économique [OCDE], 2012)¹⁵, il faut amorcer cette transition sans délai. D'autant que si aujourd'hui des solutions élégantes sont encore disponibles, il y a fort à parier qu'elles ne le soient plus demain. C'est selon le scénario « 450 » proposé par le GIEC, d'atteindre **zéro émission de GES en 2070**, condition sine qua non du maintien de l'équilibre sur Terre.

Du côté du monde économique et politique, certains penseurs sont plus optimistes et voient même en cette transition une opportunité de croissance économique. Gouvernements et économistes parient sur une réduction des GES par le marché de l'« énergie durable » (Programme des Nations Unies et du développement [PNUD], 2017)¹⁶, c'est-à-dire par une combinaison d'efficacité énergétique et de technologies « vertes » développées grâce au progrès technique. Pour stimuler la croissance mondiale à l'aide de cette nouvelle économie verte, certains gouvernements s'accordent pour élaborer des politiques de transition énergétique. C'est le cas du gouvernement québécois, qui mise sur un Québec plus prospère :

¹⁴ Morris, G., & Pehnt, M. (2015). *La Transition Énergétique, L'Énergiewende Allemande* (p. 11, 357 pages). Fondation Heinrich Böll.

¹⁵ OECD and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2012). *The OECD Environmental Outlook to 2050* (p. 1). OCDE. Consulté à l'adresse http://www.oecd.org/env/cc/Outlook%20to%202050_Climate%20Change%20Chapter_HIGHLIGHTS-FINAL-8pager-UPDATED%20NOV2012.pdf

¹⁶ Programme des Nations Unies pour le développement [PNUD]. (2017). *Énergie durable. UNDP*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.undp.org/content/undp/fr/home/ourwork/climate-and-disaster-resilience/sustainable-energy.html>

« Avec la première politique de transition énergétique du Québec, nous ferons du Québec un chef de file nord-américain dans les domaines de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Avec cette Politique, le Québec sera parmi les sociétés les plus prospères. Ensemble, continuons de nous donner les moyens de réussir la transition vers une nouvelle économie forte, diversifiée et à faible empreinte carbone », (Gouvernement du Québec, 2016)¹⁷.

Pour des ONG environnementales telles que Greenpeace, les énergies renouvelables seraient la clef d'une croissance économique soutenable :

« Renewable energy will also contribute to sustainable economic growth, high quality jobs, technology development, global competitiveness, and industrial and research leadership. » (Teske, S., Sawyer, S., & Schäfer, 2015 :27)¹⁸.

Selon le Programme des Nations Unies et du développement « PNUD », c'est même l'occasion pour les pays du Sud de se développer.

« L'énergie durable peut être un moteur pour la réduction de la pauvreté, le progrès social, l'équité, le renforcement de la résilience, la croissance économique et la durabilité écologique. [...] Au cours des 20 dernières années, le PNUD a apporté son concours à plus de 120 pays en développement et pays à revenu intermédiaire en mettant en œuvre des programmes d'accès à l'énergie renouvelable et l'efficacité énergétique. » (PNUD, 2017.)¹⁹

Même si ce ménage politique s'avère confortable, nous nous demandons dans ce mémoire s'il est réaliste. La transition énergétique, qui n'est désormais « plus qu'une cible à atteindre »,

¹⁷ Gouvernement du Québec, *Un virage historique permettant au Québec d'entrer dans l'économie du 21e siècle*. (2016). Site du premier ministre du Québec. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.premier-ministre.gouv.qc.ca/actualites/communiqués/details.asp?idCommunique=2910>

¹⁸ Teske, S., Sawyer, S., & Schäfer, O. (2015). *Energy [r]Evolution* (p. 27, 364 pages). Greenpeace International, Global Wind Energy Council, Solar Power Europe.

¹⁹ (PNUD, 2017), op. cit.

mais un « effondrement à éviter » (Nature-Québec, 2015)²⁰, pourrait-elle s’accomplir avec le maintien de la croissance économique? Cette tension caractérise toute la problématique sociétale de la transition. En effet, nous ne voyons **pas de changement significatif** montrant qu’une réelle transition est amorcée. L’usage des énergies fossiles n’a cessé d’augmenter, malgré le développement des énergies renouvelables et la recherche de l’efficacité énergétique. Ce paradoxe est tellement abscons que même après avoir dépassé 400 ppm de CO₂eq dans l’atmosphère en 2017, ce qui signifie que nous franchirons la limite à ne pas dépasser dans moins de 25 ans (figure ci-dessous), nous persistons à maintenir notre rythme de vie comme si rien n’avait changé, dans la plus parfaite irresponsabilité :

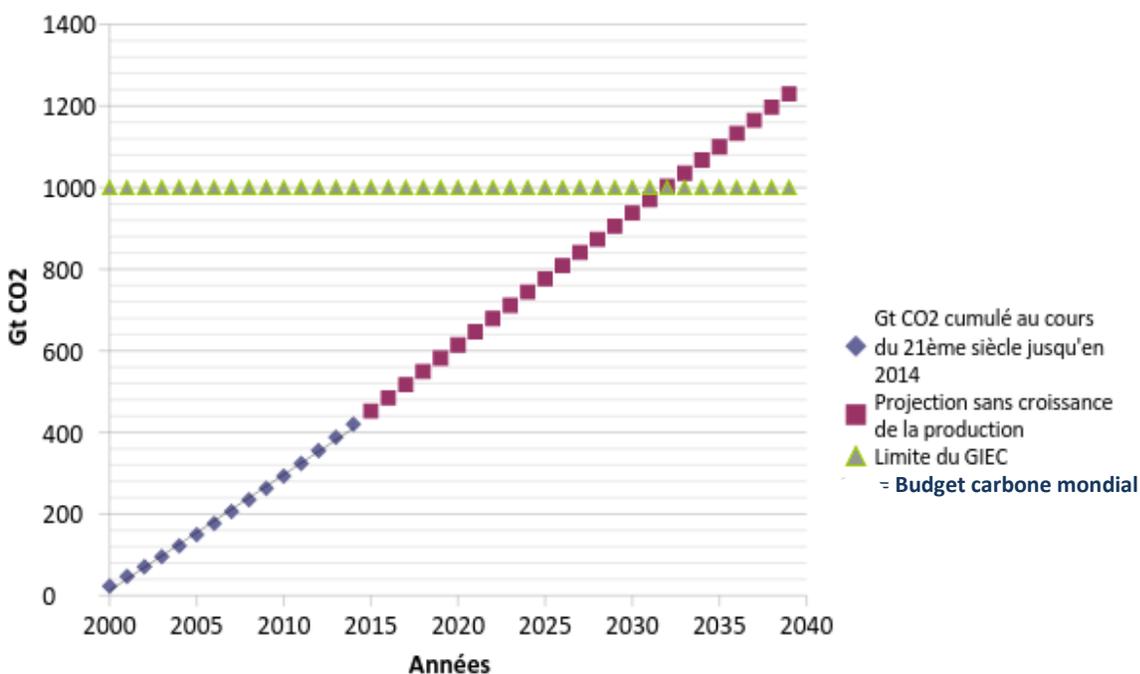


Figure 4. Evolution des émissions CO₂eq jusqu’en 2014 et projection d’émission sans croissance de la production en énergie fossile

²⁰ Nature Québec. (2015). *Plus qu’une cible à atteindre, un effondrement à éviter*. (2015). Nature Québec. Consulté 3 août 2017, à l’adresse http://www.naturequebec.org/fichiers2015/publications/ME15-10-02_ChangClim.pdf

Source : CO₂ Emissions from Fuel Combustion, OECD/IEA, Paris, 2016, version Excel

Il y a **beaucoup de discours**, tels ceux émis lors des conférences des parties pour trouver des accords climatiques, et pour autant **nous ne respectons pas les objectifs énoncés par le Protocol de Kyoto et ceux des accords de Paris**. Pourquoi? A la lumière du fait que les États-Unis et la Chine sont à la fois les deux premières puissances mondiales et les deux plus grands émetteurs de GES de la planète, nous ne pouvons en effet que constater en ce début du 21^{ème} siècle combien **nous sommes face à une impasse** entre cette volonté de vivre dans un environnement sain et la possibilité de maintenir nos conditions de vie occidentales. Nous nous demandons alors que même dans l'hypothèse où tout serait fait au mieux pour réaliser la transition énergétique, elle ne pourrait se faire qu'au prix d'une baisse de la croissance et de nos capacités de production.

C'est donc la conviction d'une croissance salvatrice que nous souhaitons interroger dans ce mémoire. D'où notre question de recherche, claire et directe : **peut-on accomplir la transition énergétique sans décroissance économique?**

Pour tenter de répondre à cette question, nous allons tout d'abord (chapitre 1) définir de manière simple ce qu'est la transition énergétique. Pour cela nous définirons les deux principaux thèmes de la transition énergétique, à savoir 1) qu'est-ce que l'énergie et 2) qu'est-ce que la croissance économique.

Dans le chapitre 2, nous proposerons un inventaire des principaux défis technico-économiques que pose la transition énergétique, dont 1) le défi inhérent au lien étroit qui existe entre la croissance économique et les énergies fossiles, 2) les enjeux relatifs à l'efficacité énergétique, et 3) ceux liés au développement des énergies renouvelables.

Enfin, au chapitre 3, afin de vérifier les hypothèses formulées au chapitre 2, nous appliquerons nos critiques au plan de transition énergétique de l'Allemagne l'*Energiewende*.

En conclusion, nous tenterons de résumer les arguments qui appuient la thèse principale défendue dans ce mémoire. Cette thèse est la suivante : puisque la croissance économique est très étroitement corrélée à la croissance de notre consommation énergétique, il semble difficile d'accomplir cette transition énergétique en maintenant une croissance économique même avec le progrès technique. D'abord, car il y aurait une relation de complémentarité entre le progrès technique et les ressources naturelles; que ces ressources naturelles seront toujours d'origine fossiles car les technologies vertes, à leur tour, entretiennent une forme de complémentarité avec elles; que ces technologies vertes ont des rendements énergétiques bien inférieurs à ceux des fossiles; et que leur intermittence et la difficulté à les stocker aggravent le problème de rendement et ne pourrait subvenir à tous les besoins d'un mode de vie occidental.

Ce mémoire se présente donc sous la forme d'un essai. Il n'a pas prétention à apporter des réponses nouvelles à la question posée, mais à clarifier et synthétiser les éléments de réponse déjà existants. Cela nous semble très nécessaire tant le discours dominant sur la transition énergétique semble esquiver de manière systématique les problèmes que pose, sur un strict plan physique, ce projet de transition énergétique.

Chapitre 1. Qu'est-ce que la transition énergétique?

1.1 Qu'est-ce que l'énergie?

1.1.1 L'énergie est une force de travail

L'énergie est au centre de tous les processus de l'univers. L'énergie est chaleur, mouvement, lumière. Autrement dit, elle est la vie (Sapy, G. 2013)²¹. Même s'il est difficile de saisir l'énergie dans son ensemble, puisque « tout est énergie » (Frédéric, 1984)²², nous percevons ses effets chaque jour tout autour de nous, et en nous. Étymologiquement, le mot « énergie » vient du grec *energeia*, qui signifie « force en action ». En physique on distingue sept formes d'énergie, toutes exprimées en Joules : l'énergie cinétique (déplacement), thermique (chaleur), électrique, chimique (réaction), rayonnante (lumière), nucléaire et gravitationnelle (Agence internationale de l'énergie [AIE], 2017)²³. L'énergie est transformée d'une forme à une autre par un travail²⁴. C'est pourquoi l'énergie équivaut au travail d'une force, c'est-à-dire au déplacement du point d'application de cette force. Soit cette énergie ne travaille pas, et dans ce cas elle est stockée; c'est l'énergie potentielle. Soit elle travaille, et dans ce cas elle devient énergie cinétique.

²¹ Sapy, G. (2013). *La transition énergétique, Pourquoi et comment elle va changer votre vie*. Paris: L'Harmattan.

²² Frederick, R. (1984). Les ressources énergétiques de notre planète, dangles

²³ EIA. (2017). *What Is Energy? - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy* - Energy Information Administration. (2017). Eia.gov. Consulté 3 août 2017, à l'adresse https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=about_home

²⁴ Le travail est effectué par une force pendant un déplacement. Le travail est le produit de la force et du déplacement. Son unité est le Joule.

1.1.2 Les deux lois de la thermodynamique

*« Les lois les plus susceptibles de résister à l'épreuve du temps
sont la 1^{ère} et le 2^{ème} loi de la thermodynamique »*

Albert Einstein.

La mobilisation d'énergie obéit à trois lois ou principes fondamentaux. Nous nous intéressons seulement aux deux premiers d'entre eux, ceux qui mettent en évidence que bien que « l'énergie totale soit conservée » (première loi de la thermodynamique), « les échanges d'énergie sont irréversibles » (Stöcker, Junot & Guillaume, 1999 :60)²⁵. L'énergie mécanique peut se transformer en énergie calorifique, mais la réciproque n'est pas vraie car elle s'accompagne d'une perte de chaleur, et seule une fraction de la chaleur peut être convertie en énergie mécanique (second principe de la thermodynamique).

Ces principes utilisent le concept d'entropie. Puisque cette grandeur physique est difficilement descriptible mais qu'elle ne reste pas moins « la grandeur fondamentale, sinon de toute la physique, de la thermodynamique » (Gonczi, 2005 : 21)²⁶, nous l'introduisons dans ce mémoire comme un concept qui permet de « faire état d'un système » (Gonczi, 2005 : 21)²⁷. A l'équilibre, l'entropie est nulle. Lors d'une transformation, la variation de l'entropie est strictement positive. La troisième loi, ou principe Nernst-Planck, permet de calculer l'entropie d'un système avec comme mesure de base l'entropie²⁸ nulle d'un cristal parfait à 0 kelvin. Mais elle ne nous est pas utile dans ce mémoire.

²⁵ H.Stöcker, F.Jundt et G.Guillaume, *Toute la physique*, Dunod, 1999.

²⁶ Gonczi, G. (2005). *Comprendre la thermodynamique*. Paris: Ellipses.

²⁷ *Ibid.*

²⁸ Voir définition au paragraphe 1.1.2.2.

Aux fins d'application et interprétations des deux premiers principes, la terre est souvent considérée comme un système thermodynamique fermé (Schwartzentruber, s.d.)²⁹ c'est-à-dire qu'elle n'échange que de l'énergie³⁰ avec le milieu extérieur, dont le soleil et l'univers en général (Rifkin, J., 2013). Autrement dit, la terre est une « structure dissipative » indépendante du temps, dont l'énergie interne reste constante (première loi), mais qui se renouvelle constamment (deuxième loi) » (Roddier, F., 2014 :4).

1.1.2.1 Première loi, ou loi de conservation

La première loi de la thermodynamique est la conservation de l'énergie relative au pouvoir de l'énergie de passer d'une forme à une autre, sans créer ni détruire sa quantité initiale. Elle postule que « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Cette loi, énoncée par Antoine Lavoisier (1743 – 1794) en 1977, montre une idée fondamentale dans la compréhension de l'énergie. L'énergie sur terre ne se produit pas, elle se transforme. Par exemple, « de la chaleur apparaît en cassant un objet, ou du travail mécanique est transformé en énergie électrique dans un générateur électrique » (Stöcker *et.al.*, 1999 : 675).

Afin d'être utilisable par l'homme, l'énergie doit être pour la majeure partie du temps **transformée**. Plusieurs types de transformations existent. On parle alors de transformation énergétique ou de conversion d'énergie pour désigner la transformation d'une énergie en une autre. Plusieurs types de conversion d'énergie existent, tels que l'oxydo-réduction qui est la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique; la combustion (énergie chimique → énergie thermique); les frottements (énergie mécanique → énergie thermique); le pompage

²⁹ Schwartzentruber, J. (s.d.). Thermodynamique. - Exercice : Système fermé ou ouvert ?. Nte.mines-albi.fr. Consulté le 13 septembre 2017, à l'adresse http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/exo_Systemes.html.

³⁰ Elle échange aussi de la matière (météorites, satellites) mais cela reste une infime quantité par rapport à l'énergie qu'elle échange avec le soleil par exemple (Schwartzentruber, s.d.).

(énergie mécanique → énergie hydraulique); l'effet Joule (énergie électrique → énergie thermique); la turbine à vapeur et l'alternateur (énergie thermique → énergie électrique); l'incandescence (énergie thermique → énergie rayonnante); l'effet photovoltaïque (énergie rayonnante → énergie électrique) et l'absorption (énergie rayonnante → énergie thermique) (Revel, S., 2013)³¹.

1.1.2.2 L'entropie et le principe de la seconde loi de la thermodynamique

L'entropie est un concept qui décrit que les transformations sont irréversibles, et que lors de ces conversions, une partie de l'énergie se transforme de manière irréversible en énergie indisponible. La seconde loi de la thermodynamique, établie par Sadi Carnot (1796 – 1832) en 1824 (Roddier, F., 2014)³² puis exprimée par une formule mathématique de Ludwig Boltzmann en 1877 (Roddier, F., 2014).

Cette loi établit le principe de la perpétuelle augmentation de l'entropie, c'est-à-dire **la perte énergétique disponible continue**.

Si la quantité d'énergie reste fixe (1^{ère} loi), telle que l'énergie mécanique E_m qui est la résultante de l'énergie cinétique K et de l'énergie potentielle U ($E_m = K + U = \text{constante}$), **l'énergie se transforme continuellement d'une forme disponible en une forme indisponible**. Du chaud au froid, du concentré au dispersé, d'un état ordonné à un état désordonné, l'entropie totale augmente continuellement. Pour l'énergie mécanique, « comme il est difficile d'éviter des frictions ou des frottements, l'énergie mécanique a toujours tendance à se transformer en chaleur » (Roddier, F., 2014 :2) dont une partie sera inutilisable.

³¹ Revel, S. (2013). *Les différents types de conversion d'énergie*. *Energieplanete.fr*. Consulté 2 août 2017, à l'adresse <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-types.html>

³² Roddier, F. (2014). Thermodynamique et économie des sciences exactes aux sciences humaines. *Res-Systemica*, 12(3), 2-4. Consulté à l'adresse <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/vol12-msc/res-systemica-vol-12-art-03.pdf>

Ainsi, l'énergie se divise en « énergie utilisable ou libre, qui peut être transformée en énergie inutilisable ou liée qui ne peut pas être transformée » (Georgescu-Roegen, N. 1995 : 64)³³. Il y a donc une distinction entre des ressources énergétiques de valeur et de basse entropie, et les déchets, énergie sans valeur, de haute entropie » (Georgescu-Roegen, N. 1995 : 67) :

« L'énergie se présente sous deux états qualitativement différents, l'énergie utilisable ou libre, sur laquelle l'homme peut exercer une maîtrise presque complète, et l'énergie inutilisable ou liée, que l'homme ne peut absolument pas utiliser. L'énergie chimique contenue dans un morceau de charbon est de l'énergie libre parce que l'homme peut la transformer en chaleur, ou, s'il le veut en travail mécanique. Mais la quantité fantastique d'énergie thermique contenue dans l'eau des mers, par exemple, est de l'énergie liée. Les bateaux naviguent à la surface de cette énergie mais, pour ce faire, ils ont besoin de l'énergie libre d'un quelconque carburant ou bien du vent. Lorsqu'on brûle un morceau de charbon, son énergie chimique ne subit ni diminution ni augmentation. Mais son énergie libre initiale s'est tellement dissipée sous forme de chaleur, de fumée et de cendres, que l'homme ne peut plus l'utiliser. » (Georgescu-Roegen, N. 1995 : 47).

La thermodynamique met donc de l'avant le fait que

a) Nous ne pouvons utiliser « qu'une forme d'énergie particulière » de basse entropie très concentrée, comme le charbon par exemple.

b) Toute mobilisation de l'énergie se traduit par une perte d'énergie utilisable. D'où la nécessité par exemple de mesurer le rendement de conversion d'une centrale qui désigne le rapport de l'énergie convertie à l'énergie d'entrée (Stöcker *et.al.*, 1999 : 676). Par exemple, dans un générateur électrique, on mesure le rapport entre l'énergie électrique convertie et l'énergie mécanique d'entrée.

c) Contrairement à ce que les théories économiques classiques en disent, ce principe rend compte du caractère irrévocable de la dégradation entropique de la matière-énergie. **Le processus économique serait donc considéré comme un flux entropique à sens**

³³ Georgescu-Roegen, N. (1995). *La décroissance. Entropie - Écologie - Économie* (2nd éd., p. 64, 254 pages). Paris: Sang de la terre.

unique d'énergie et de matériaux. Ainsi, ni la croissance infinie, ni l'état stationnaire n'existent (voir chapitre 2). C'est, d'après Roegen, à une décroissance sans fin que nous sommes nécessairement confrontés.

Ainsi, l'économie circulaire, ou ce « système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en permettant le bien-être des individus » (Geldron, A., 2014)³⁴ peut-elle être physiquement possible? D'après le second principe, l'idéal d'une économie circulaire se voulant un « cycle de développement positif continu qui préserve et développe le capital naturel » (Ellen MacArthur Foundation, 2017)³⁵ serait un idéal illusoire car on ne peut renouveler indéfiniment l'énergie que nous mobilisons. De même pour la stratégie de recyclage, cette loi met en évidence qu'un déchet ne pourra jamais être recyclé indéfiniment car à chaque étape de transformation, il subira une perte d'énergie qu'on ne pourra jamais plus utiliser.

1.1.3 Quelle énergie mobilisons-nous?

1.1.3.1 Energies non renouvelables, Energies renouvelables

Nous mobilisons deux catégories d'énergie, les renouvelables et les non renouvelables.

Les sources d'énergie sont considérées non renouvelables lorsqu'elles ne se forment ni ne se reconstituent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle d'une vie

³⁴ Définition de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie [ADEME], donnée par Geldron, A. (2014). *Économie Circulaire: Notions* (p. 1). Angers: ADEME. Consulté à l'adresse <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-economie-circulaire-oct-2014.pdf>

³⁵ Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Économie circulaire*. *Ellenmacarthurfoundation.org*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/concept>

humaine (techno-science, 2017)³⁶. Ces énergies sont le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium (qui contient l'énergie nucléaire). Celles-ci sont le résultat physique de « millions d'années de lumière solaire intermittente » stockée et « concentrée en une source d'énergie extractive » (Heinberg, R. et D. Lerch, 2010 : 229, traduction libre)³⁷, ce qui leur confère un pouvoir énergétique extraordinaire. De ce fait, ce sont ces énergies que nous mobilisons principalement, à 80%. Et puisqu'il faut des millions d'années à la planète pour les régénérer, nous conviendrons aisément que les ressources consommées par l'humain, n'ont aucune chance de s'être renouvelées à l'échelle de l'humanité, sinon de l'ordre quasi nul de « 0,001% d'augmentation » (Jancovici, J. 2014)³⁸.

L'énergie renouvelable, qui se reconstitue naturellement dans un bref laps de temps au cours de la durée de vie humaine, provient quant à elles « de 2 grandes sources naturelles : le Soleil et la Terre (qui dégagent de la chaleur) » (EDF, 2017)³⁹. Ces deux sources créent plusieurs types de flux d'énergies renouvelables. La Terre recevant de l'énergie solaire inégalement répartie, ce déséquilibre dans la répartition met alors en mouvement les fluides terrestres de l'atmosphère et de l'hydrosphère.

³⁶ *Energie non-renouvelable : définition et explications.* (2017). *Techno-science.net*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=10466>

³⁷ Heinberg, R., & Lerch, D. (2010). *The Post Carbon Reader: Managing the 21st Century's Sustainability Crises* (1st éd., p. 229, 523 pages). Watershed Media.

³⁸ Jancovici, J. (2014). *A quand le pic de production mondial pour le pétrole?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/a-quand-le-pic-de-production-mondial-pour-le-petrole/>

³⁹ EDF. (2017). *Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?*. EDF France. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/qu-est-ce-qu-une-energie-renouvelable>

Le Soleil est donc à l'origine du mouvement hydraulique de l'hydrosphère⁴⁰ (courants, marées), de l'énergie éolienne (le vent) et de la biomasse, cette dernière étant définie comme une «Source énergétique par combustion, ou par fermentation et pourrissement contrôlé» (Frédéric, R., 1984 : 20)⁴¹ du bois et matières organiques d'origine végétale ou animale (Hydro-Québec, 2016)⁴². Aujourd'hui, la biomasse qui est la plus utilisée dans le monde est le bois (Ressources Naturelles Canada [Rncan], 2016)⁴³. Toutefois une attention particulière est portée sur le potentiel renouvelable de la biomasse. Celle-ci est considérée comme une ressource renouvelable à condition que « son taux de consommation ne soit pas supérieur à son taux de régénération. » (Rncan, 2016).

La Terre quant à elle crée un flux d'énergie géothermale à partir de l'énergie thermique provenant de son noyau et remontant vers la surface. Soit on capte de la vapeur d'eau pour y créer de l'électricité, soit on utilise directement les différences de températures entre l'air extérieure et la température sous terre pour créer de la chaleur ou du refroidissement (Rncan, 2016)⁴⁴.

Ainsi, l'énergie que nous mobilisons vient soit d'un stock énergétique fini que nous avons emmagasiné sur Terre (les non renouvelables), soit de flux continus de radiation solaire créant différents types de forces et de flux d'énergie thermiques provenant du centre de la Terre créant l'énergie géothermique.

⁴⁰ Partie de la croûte terrestre occupée par les eaux et les glaces, *HYDROSPHÈRE : Définition de Hydrosphère*. (2017). Cnrtl.fr. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrosph%C3%A8re>

⁴¹ Frédéric, R. (1984). *Les ressources énergétiques de notre planète*. Dangles. (p.20, 443 pages)

⁴² *L'énergie de la biomasse | Les énergies renouvelables*. (1996). *Hydroquebec.com*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/energie-biomasse.html>

⁴³ Rncan.(2016). *À propos de l'énergie renouvelable*. (2016). Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296#bio>

⁴⁴ *Ibid.*

Par ailleurs, dans nos sociétés, afin d'être utilisable et répondre aux besoins des individus, l'énergie mobilisée doit subir de facto des changements d'état. Le but de l'industrie est de transformer une énergie peu utile en une énergie plus utile pour notre usage.

1.1.3.2 Système énergétique et statistiques

Les différents types d'énergie que nous mobilisons doivent être **transformés** par un **système énergétique** afin d'être utilisés par l'homme pour répondre à ses besoins : se loger, s'éclairer, se chauffer, communiquer, etc. Nous mettons l'accent sur le fait que la **production énergétique** est un « abus de langage » (Thévard, B. 2013 : 3)⁴⁵ désignant le processus de **transformation** d'une ressource (pétrole, charbon) par un système énergétique (mines, raffinerie, centrale électrique) en un **produit et/ou service**. Pour le reste de ce mémoire, nous emploierons le plus souvent les termes « transformation », « mobilisation » ou « utilisation » pour ne pas porter à confusion. Le terme « produit énergétique » est utilisé pour désigner tant les combustibles que l'électricité et la chaleur. Ce processus de transformation est communément représenté par une « chaîne de valeur énergétique » :

⁴⁵ Thévard, B. (2013). La diminution de l'énergie nette, frontière ultime de l'Anthropocène, Séminaire du 13 décembre 2013. *Institut Momentum*, 3, 7 pages. Consulté à l'adresse <http://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2014/01/La-diminution-de-l%E2%80%99%C3%A9nergie-nette.pdf>

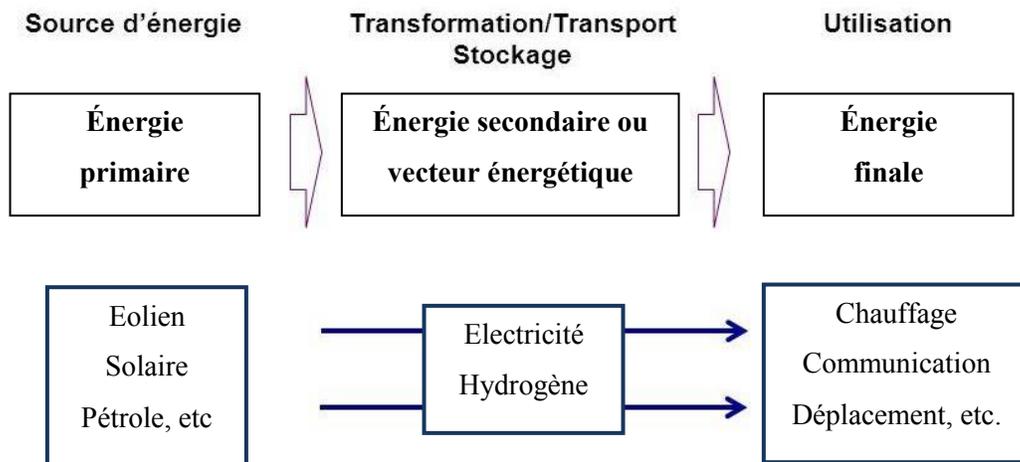


Figure 5. Chaîne de valeur énergétique simplifiée. Source: Léonard, Belboom & Renzoni, s.d.⁴⁶

Cette chaîne de valeur montre qu'une énergie primaire (du charbon, par exemple) est transformée en énergie secondaire (électricité) afin d'être transportée et stockée pour être ensuite utilisée en énergie finale (de la chaleur, par exemple). Pour se donner une idée des sources et secteurs énergétiques d'un système, la figure ci-dessous montre la consommation d'énergie primaire par source (pétrole, gaz, charbon, énergies renouvelables et énergie nucléaire) et par secteur (transport, industrie, résidentiel et commerciale, secteur électrique) aux États-Unis :

⁴⁶ Léonard, A., Belboom, S., & Renzoni, R. *Vecteurs énergétiques et énergies renouvelables* (p. 3, 51 pages). Liège: Université de Liège. Consulté à l'adresse https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/83107/1/Energie_ALeonard.pdf

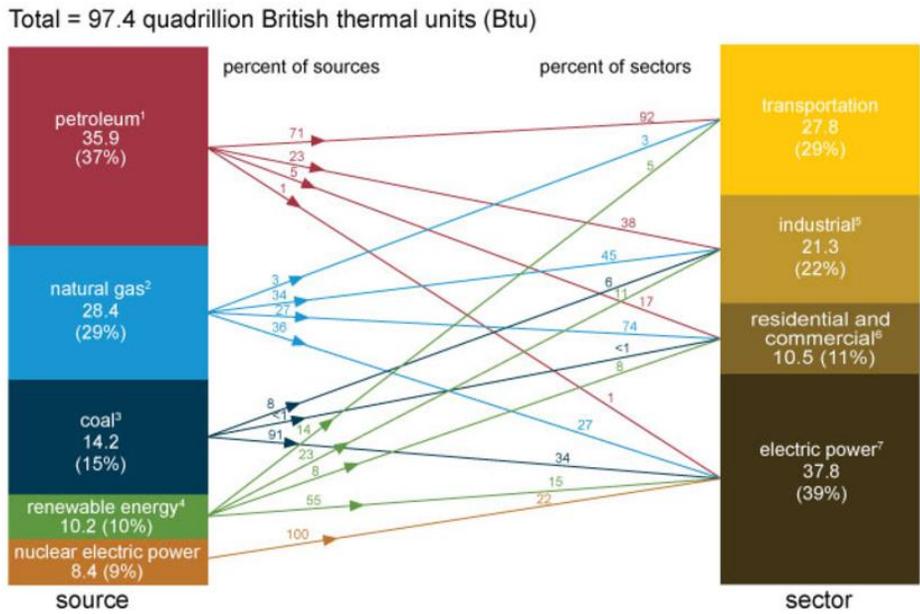


Figure 6. Consommation énergétique primaire par secteur et par source, aux U.S.A, en 2016, Source : EIA, 2017⁴⁷

Concernant les énergies renouvelables, celles-ci sont captées et transformées par des technologies qu'on appelle technologies vertes, avant d'être utilisables :

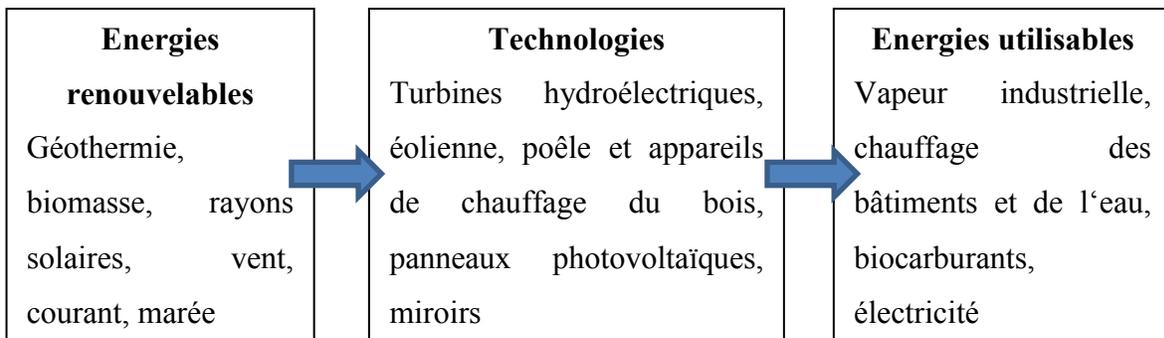


Figure 7. Processus de transformation des énergies renouvelables en énergies utilisables

⁴⁷ : U.S. Energy Information Administration [EIA]. (2017), U.S. Primary Energy Consumption by Source and Sector, 2016, Consulté à l'adresse https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/flow/css_2016_energy.pdf

Source : Ressources Naturelles Canada [Rncan], 2016⁴⁸

Ces technologies « vertes » sont nombreuses : l'éolien, le panneau solaire photovoltaïque, les miroirs ou lentilles solaires thermiques à concentration CSP, l'hydroélectricité, la bioénergie, la centrale marée motrice, la géothermie.

1.1.3.3 Énergie primaire, énergie finale, vecteur énergétique et bilan énergétique

Le système énergétique distingue l'énergie « primaire », le « vecteur énergétique » et l'énergie « finale » :

a) L'**énergie primaire** est l'énergie potentielle du Soleil et de la Terre contenue dans les ressources naturelles avant toute transformation. Pour se donner un aperçu de la demande primaire en énergie, qu'elle soit directement extraite du sol (combustibles fossiles) ou transformée via des technologies vertes, on utilise le **TPES**, acronyme de « Total Primary Energy Supply », traduit par « approvisionnement total en énergie primaire » ou « consommation énergétique primaire », qui comptabilise à la fois l'énergie extraite d'un pays et l'énergie importée pour répondre à la demande. Statistiquement, les principales ressources naturelles utilisées aujourd'hui sont les combustibles fossiles – **pétrole, charbon et gaz** – qui constituent 81% de l'approvisionnement énergétique dans le monde en 2014, ce qui représente 13 699 Mtoe (millions de tonnes équivalent pétrole), soit 573,5 EJ (Exa Joule) (figure ci-dessous). Le pétrole est en tête, avec 4 287 Mtoe, soit 179,5 EJ produits (représentant 31,3% dans la part des énergies primaires), suivi du charbon (28,6%) et du gaz (21,2%). La biomasse (10,3%) et l'uranium (4,8%) sont deux autres ressources naturelles également très utilisées.

⁴⁸ Ressources Naturelles Canada [Rncan]. (2016). L'univers des énergies renouvelables. Consulté à l'adresse <https://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296>

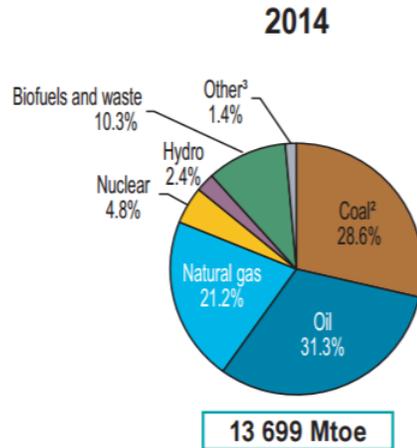


Figure 8. Part des énergies primaires dans le TPES mondial en 2014,

Source : Agence internationale de l'énergie [AIE], 2016: 6⁴⁹.

b) Un **vecteur énergétique**, ou énergie secondaire, est une forme d'énergie transformée qu'on ne retrouve pas directement dans la nature et qui sert à « véhiculer » une autre forme d'énergie. Il existe deux vecteurs énergétiques : **l'électricité et l'hydrogène** (EIA, 2017)⁵⁰. L'hydrogène, est l'élément le plus simple et le plus abondant de l'Univers. Sur Terre, Il est un vecteur énergétique qui n'existe presque pas à l'état naturel. L'hydrogène sous forme de gaz, soit du dihydrogène (H₂), devient un vecteur énergétique servant de phase intermédiaire entre l'énergie primaire et finale. Cependant il n'existe pas à l'état naturel. Combiné à l'oxygène pour former de l'eau (H₂O) ou au carbone pour former des chaînes carbonées telles que les hydrocarbures (pétrole, charbon), on doit utiliser un apport

⁴⁹ Agence Internationale de l'Energie [AIE]. (2016: 6). Key World Energy Statistics 2016 (p. 6, 80 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>

⁵⁰ EIA. (2017). *Home - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy* - Energy Information Administration. (2017). Eia.gov. Consulté le 2 août 2017, à l'adresse <https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm>

énergétique pour l'« extraire » de ces molécules. L'avantage incontestable du dihydrogène est qu'il est, contrairement à l'électricité, stockable. On le stocke généralement dans une pile à combustible (EIA, 2017)⁵¹

c) L'**énergie finale** est l'énergie consommée et facturée à chaque bâtiment, en tenant compte des pertes liées à la production, au transport et à la transformation de l'énergie primaire. Pour la mesurer, on utilise le **TFC**, acronyme de « total final consumption », estimé à 9 425 Mtoe en 2014.

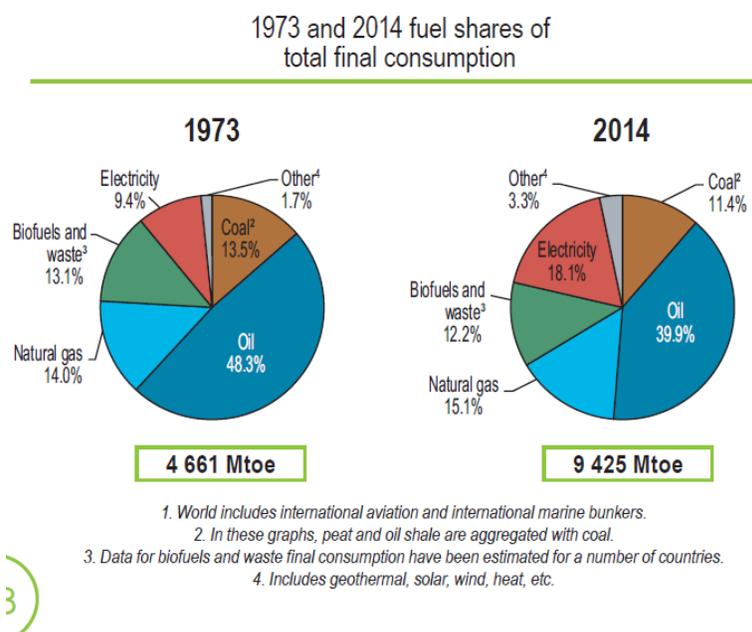


Figure 9. Evolution de la part des énergies dans la consommation finale dans le monde, en 1973 et en 2014

Source : Agence internationale de l'énergie, [AIE], 2016 : 28⁵²

⁵¹ EIA. (2017). *Hydrogen - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy* - Energy Information Administration. Eia.gov. Consulté 3 août 2017, à l'adresse https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydrogen_home

1.1.3.4 Pertes énergétiques lors des transformations

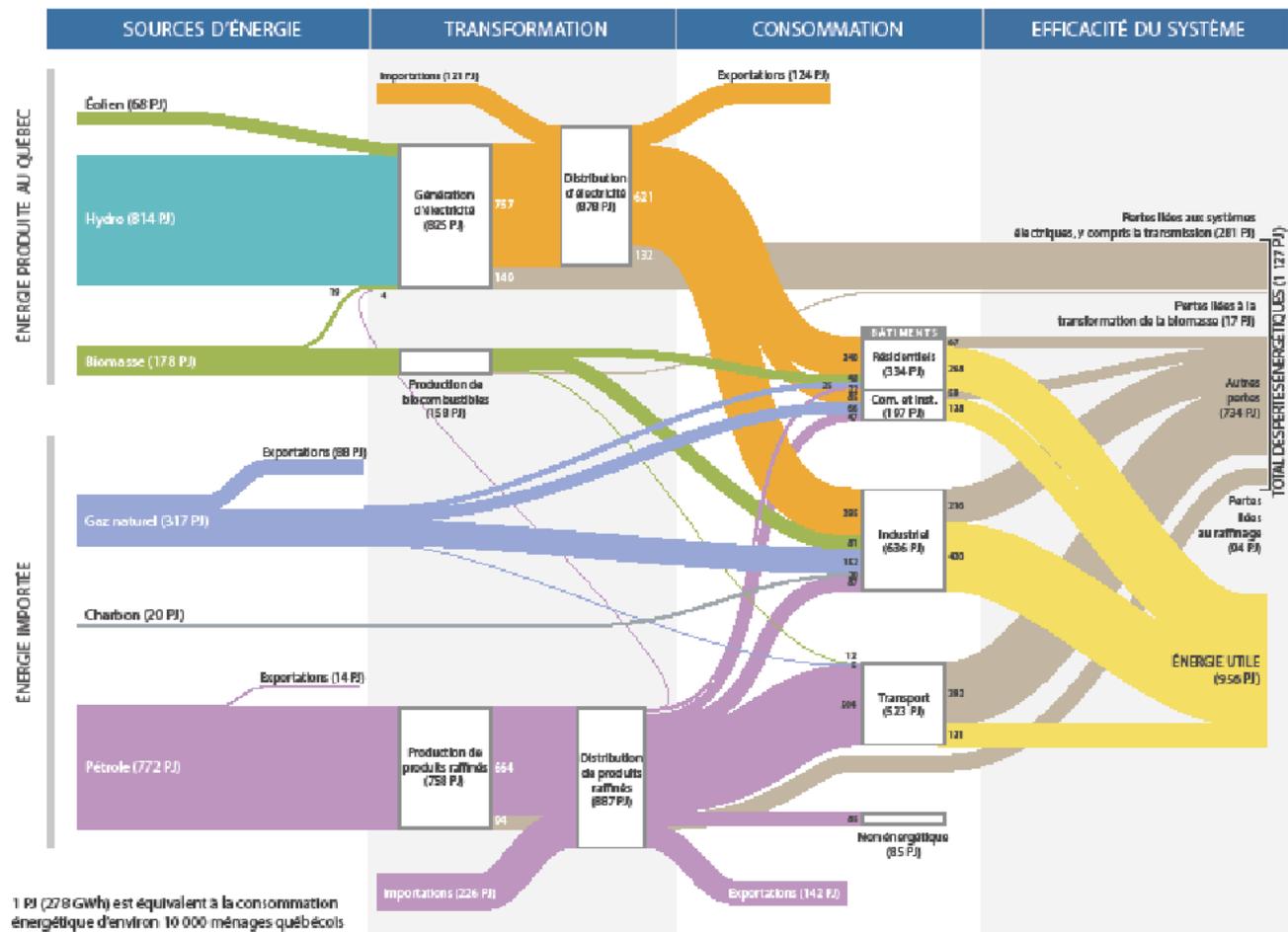
Nous avons vu que l'énergie principale que nous mobilisons est l'énergie stockée dans les combustibles fossiles et l'uranium. Celle-ci est transformée par un système énergétique avant d'être utilisée dans le secteur des transports, résidentiel et industriel. Lors de la transformation, il y a perte importante d'énergie. Pour rendre compte de cela, on utilise un bilan énergétique. Celui-ci a l'avantage de présenter le système énergétique complet et les données énergétiques avant et après chaque transformation. Pour se donner une idée d'un bilan énergétique global, un flux énergétique est souvent présenté, tel que celui du Québec de 2013 présenté ci-dessous qui rend compte du cheminement des flux énergétiques depuis la source (importée ou extraite sur place) jusqu'à la consommation finale :

⁵² Agence Internationale de l'Energie. (2016). Key World Energy Statistics 2016 (p. 28, 80 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>

Figure 10. Flux énergétique au Québec en 2013

Source: Whitmore & Pineau (2016)

GRAPHIQUE 3.1 - BILAN ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC, 2013



1 PJ (27,8 GWh) est équivalent à la consommation énergétique d'environ 10 000 ménages québécois

Notes: Certains totaux ne s'additionnent pas parfaitement en raison d'arrondissement et du fait que les procédés énergétiques inférieurs à 3 PJ ne sont pas affichés sur le diagramme. La disparité dans les données du gaz naturel reflète les données fournies par Statistique Canada. Les notes méthodologiques pour l'élaboration du graphique 3.1, ainsi que l'explication de certains changements par rapport au bilan de 2012, sont disponibles sur le site de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie: energie.hec.ca

Sources: Statistique Canada, 2015; Office de l'efficacité énergétique, 2015; Whittier Technologies Inc. et CESAR (CanES, scénario de référence 2013); Hydro-Québec, 2014.

Réalisation: Benjamin Whittier
 Co-Autorisation: Johanne Whitmore (HEC Montréal),
 Pierre-Olivier Pineau (HEC Montréal), David Luyail
 (CESAR), Bastiaan Straatman (Whittier Technologies)

Outre l'intérêt de présenter un bilan énergétique global selon les différentes sources d'énergie et différents secteurs, l'un des intérêts de ce graphique pour ce mémoire est qu'il permet de montrer l'effroyable perte énergétique « liées à certaines inefficacités du système » (Whitmore & Pineau, 2016 : 4)⁵³. Sur près de 2000 PJ mobilisées au Québec, plus de la moitié, soit 58% (1 127 PJ), sont perdus lors des transformations « au cours de la transformation, du transport et de la consommation de l'énergie » (Whitmore & Pineau, 2016 : 5).

1.1.4 Comment comparer les énergies entre elles?

1.1.4.1 Unité

Il est important, dans le cadre de la problématique, de montrer comment on compare les énergies entre elles. L'unité d'énergie est « le joule (J) dans le système international (SI) ». 1 joule = 1 NM (newton mètre pour le travail mécanique) = 1 Ws (watt-seconde pour l'électricité) = 1 kg.m².s⁻². Pour exprimer les quantités des différentes formes de ressources énergétiques, nous employons les unités correspondant à la nature de la source : volume [m³] pour le gaz, tonne pour le charbon, hauteur [m] et volume [m³] pour l'eau, vitesse [m.s⁻¹] pour le vent (AIE, 2005 : 19)⁵⁴. Afin de les comparer, **l'unité de mesure est la tonne équivalent pétrole « tep ».**

1 tonne charbon = 0,6 tep; 1 000 m³ gaz = 1 tep = 11 600 kWh; 1 stère de bois = entre 0,1 et 0,16 tep.

1 habitant d'Amérique du Nord consomme environ 8 tep par an (Sapy, 2013 : 21)

1 habitant de l'Allemagne consomme environ 4 tep par an (Sapy, 2013 : 21)

⁵³ Whitmore, J., & Pineau, P. (2016). *Etat de l'Energie au Québec* (p. 4, 39 pages). Montréal: Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal.

⁵⁴ Agence Internationale de l'Energie (2005). *Manuel sur les statistiques de l'énergie* (p. 19, 210 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_french.pdf

1,5 tep / hab. (Chine); 0,6 tep (Inde), 0,5 tep pour la majorité des pays de l'Afrique subsaharienne (Sapy, 2013).

Le tableau ci-dessous définit les unités utilisées en énergie et leur usage.

Unité	Symbole	Définition	Usage	Nombre de Joules
Joule	J	Unité de référence. Défini comme le travail d'une force d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.	TPES - Consommation énergétique	1 Joule = 1 kg.m ² .s ⁻²
Tonne équivalent pétrole	Tep/toe	Energie calorifique d'une tonne de pétrole « moyen ».	TPES - Pétrole	1 tep = 7,33 barils de pétrole = 4,186x10 ¹⁰ Joules
Kilowattheure	kW·h ou kWh	Energie consommée par un appareil de 1000 watt pendant une heure	Électricité	3,6 mégaJoules
Calorie	Cal	« Quantité de chaleur nécessaire pour élever 1g d'eau dégazée de 14,5°C à 15,5°C sous 1bar de pression atmosphérique. »		1 cal = 4,19 J
British Thermal Unit	Btu	Quantité de chaleur nécessaire pour élever d'1°F 1 livre anglaise d'eau dans une		1 BTU = 1 055 J

		atmosphère d'1 bar.		
--	--	---------------------	--	--

Tableau I. Unités, symboles et définition des énergies utilisées

1.1.4.2 Des stocks et des flux

Il y a deux types de rendement. Il y a l'EROI et le pouvoir calorifique que nous allons décrire dans les paragraphes suivants. Puisque les EF (et une partie des ER telle que la biomasse) sont des stocks et que les ER (vent, rayons solaires) sont des flux, on ne calcule pas leur rendement de la même manière :

1/ Pour les EF et la biomasse, considérés comme des **stocks**, on utilise une quantité. Pour mesurer l'EROI, on utilise la Ressource Ultimentement Récupérable (RUR) en EJ (Court, 2017), présenté dans le paragraphe 1.1.4.4. Pour mesurer le pouvoir calorifique, on va évaluer la quantité d'énergie (nombre de kWh ou de Joules) **qu'il peut fournir après transformation par unité de masse** mobilisée. Pour se donner une idée, **le pouvoir calorifique moyen du charbon** qu'il peut fournir après transformation est de « 2 083 kWh/tonne en 2009 » (Cornot-Gandolphe, S., 2016)⁵⁵, d'après les données de l'AIE c'est-à-dire qu'une tonne de charbon va pouvoir fournir 2 083 kWh après transformation dans une centrale, d'une capacité de 30% (Cornot-Gandolphe, S., 2016)⁵⁶.

2/ Puisque les ER (énergies renouvelables telles que le vent et les rayons solaires) n'ont pas ni de masse ni ne peuvent être contenue en volume, elles sont considérées comme des

⁵⁵ Cornot-Gandolphe, S. (2016). *Centrale à charbon. Connaissance des Énergies*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>

⁵⁶ La centrale a une efficacité de 30%, c'est-à-dire qu'elle fournira un rendement de 30% par rapport au pouvoir calorifique de l'hydrocarbure mobilisé, expliqué au chapitre 1. Cornot-Gandolphe, S. (2016). *Centrale à charbon. Connaissance des Énergies*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>

flux. On ne peut alors mesurer qu'un type de rendement, l'EROI. Celui-ci est illustré par le Potentiel Technique (PT) en EJ/an (Court, 2017). Pour mesurer son EROI, on va mobiliser le débit d'énergie que peut fournir une puissance installée (son nombre d'EJ) en tenant compte de son **facteur de capacité**, c'est à dire le taux annuel réel auquel elle a fonctionné. Si on calcule **l'EROI d'une éolienne** par exemple, on prend en compte les caractéristiques de la centrale éolienne dimensionnée selon la puissance du vent. Elle sera caractérisée par une **puissance installée** (2 MW) pouvant transformer le débit de vent qu'elle reçoit (4 millions de kWh par an par exemple), ce qui correspond à un fonctionnement à plein régime d'un peu plus de 2 000 heures par an, soit de 6 heures par jour (Cornot-Gandolphe, 2017)⁵⁷ durant sa durée de vie, de l'ordre d'une vingtaine d'années.

1.1.4.3 Pouvoir calorifique des combustibles fossiles et de la biomasse

En 1843, James Prescott Joule établit l'équivalent de la calorie (Roddier, F. 2014), soit la quantité de chaleur qu'il faut mobiliser pour élever d'1 degré Celsius la température d'un gramme d'eau liquide. Celui-ci établit⁵⁸ qu'1 calorie est égale à 4,1855 J. Ainsi, le pouvoir calorifique ou PCI (pouvoir calorifique inférieur) d'un combustible représente la quantité de chaleur obtenue suite à sa combustion⁵⁹. Il est exprimé en Joules (ou Btu)/ Kg.

Un ordre de grandeur du pouvoir calorifique fossile est exprimé ci-dessous.

⁵⁷ Cornot-Gandolphe, S. (2017). *Centrale à charbon. Connaissance des Énergies*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>

⁵⁸ 4,19 J est une valeur moyenne car la calorie dépend de la température et de la pression atmosphérique. On ne mobilise pas la même quantité de chaleur pour élever un gramme d'eau de 11 à 12°C ou de 20 à 21°C par exemple.

⁵⁹ Agence internationale de l'énergie (2005), *Manuel sur les statistiques de l'énergie*, Paris : OCDE/AIE, p. 19

Combustible	PCI (MJ/kg)
gaz naturel	46,3
méthane	50
diesel	43,1
essence	43,2
charbon	29,4

Tableau II. Pouvoir calorifique des combustibles fossiles en MJ/kg

Source : Godard, Morin, Ferchaud, Wohlfahrt, Nguyen, & Hopquin, 2012 : 14⁶⁰

Biomasse	PCI anhydre (MJ/kg)
Miscanthus	18,5
Switchgrass	18,5
Luzerne	16,8
Sorgho	16,8
Fétuque	17,2
Triticale	16,5
TtCR de saule	17,6
Paille de céréales	16,5
Paille de lin oléagineux	17,9
Bois (quelle que soit sa forme)	18,4

Tableau III. Pouvoir calorifique de quelques sources de biomasse en MJ/kg

Source : Godard, et al., 2012 : 13⁶¹

Nous constatons que les PCI des combustibles fossiles sont pour la plupart deux à trois fois plus importants que ceux de la biomasse. Par exemple, le gaz naturel a le plus fort PCI des combustibles fossiles, valant 46,3 MJ/kg comparé à 18,4 MJ/kg pour du bois. Ce qui signifie que pour obtenir le même rendement, on devrait, pour la biomasse, exploiter de très grandes surfaces. Nous y reviendrons au chapitre 2.

⁶⁰ Godard, C., Morin, A., Ferchaud, F., Wohlfahrt, J., Nguyen, E., & Hopquin, J. (2012). Biomasse énergie : le point sur 15 idées reçues, Eléments d'expertise sur la valorisation énergétique de la biomasse agricole (p. 14, 53 pages). RMT Biomasse Energie Environnement et Territoire. Consulté à l'adresse http://www.biomasse-territoire.info/fileadmin/site_bioter/documents_bioter/RMT_biomasse/RMT_Biomasse-Evaluation-light.pdf

⁶¹ *Ibid.*, p.13.

1.1.4.4 EROI

Il faut de l'énergie pour mobiliser de l'énergie. Et pour que cet effort ait un sens, il faut que la quantité d'énergie utilisée pour mobiliser de l'énergie soit inférieure à l'énergie finalement utilisable. C'est ce que l'on mesure avec le calcul de l'énergie nette, mais aussi avec ce que l'on appelle l'EROI⁶². L'EROI est une mesure de **l'accessibilité** de l'énergie. Il mesure le rapport entre l'énergie obtenue et l'énergie investie pour la « produire » (Hall, C., et D. Murphy, 2010 : 102-103)⁶³ :

$$\text{Équation (1) } EROI = \frac{\text{Énergie produite [Joules]}}{\text{Énergie investie pour obtenir cette énergie [Joules]}}$$

Par exemple, « l'extraction de 200 MJ de pétrole brut nécessite 4 MJ d'énergie directe sous la forme de produits raffinés – diesel ou électricité – et 4 MJ d'énergie indirecte liée aux équipements mobilisés. Ainsi, la production de 200 MJ à la tête du puits a nécessité un total de 8 MJ d'investissement énergétique afin que l'EROI soit égal à 25: 1 (200/8 = 25). (Court, V., 2016 :125)⁶⁴.

⁶² Dans la littérature, le taux de retour énergétique dont l'acronyme est ERoEI (*Energy Return on Energy Invested*) ou EROI (*Energy Return on Investment*), également appelé taux de retour énergétique, ratio énergétique net, rendement énergétique de l'investissement énergétique, surplus énergétique ou balance énergétique, est un concept introduit par Charles Hall *et al.*, et Cleveland *et al.*, suite aux crises pétrolières de 1970 (Hall, C., et D. Murphy, *Year in review-EROI or energy return on (energy) invested* Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 1185, 2010, pages 102-118). L'EROI a d'abord été étudié dans le but de mettre en évidence l'évolution dans le temps de la « production » d'énergie, notamment depuis le début de l'ère pétrolière à l'aube du XX^e siècle (Thévard, B. 2013).

⁶³ Hall, C., et D. Murphy, *Year in review-EROI or energy return on (energy) invested* Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 1185, 2010, p102-103, pages 102-118

⁶⁴ Court, V. (2016). *Énergie, EROI Et Croissance Économique Dans Une Perspective De Long Terme* (Doctorat Es Sciences Économiques). Université Paris Nanterre, Ifp Énergies Nouvelles, Chaire Économie Du Climat (p.125, 285 pages)

L'EROI peut exprimer différentes valeurs, dépendamment des étapes de processus auxquels la quantité d'énergie investie est prise en compte (Tremblay, H., 2013)⁶⁵. Si nous prenons l'exemple de la chaîne de transformation du pétrole, l'EROI sera différent si on arrête les calculs en tête de puits (EROI calculé précédemment), ou après le raffinage, après le transport. Plus généralement, on va exprimer

1/ Un $EROI_{st}$ pour désigner l'énergie requise à l'extraction (extraire le vent par une centrale éolienne – donc avec les coûts associés de fabrication, de maintenance, etc. – extraire du charbon). Dans le cas d'un flux d'énergie renouvelable, on va calculer l'EROI à partir d'une énergie finale (l'électricité transformée à la sortie de l'éolienne) tandis que pour un stock d'EF, on mesure une énergie primaire, donc pas encore transformée.

2/ Un $EROI_{pou}$ pour désigner l'énergie requise pour transformer et délivrer cette énergie (coût du transport, perte relative au transport, coût du réseau, coût de fabrication de la raffinerie coût de la centrale thermique, coût de la centrale éolienne). Dans le cas de stocks ou de flux, on mesure cet EROI à partir de d'énergie finale.

3/ Un $EROI_{ext}$ pour désigner l'énergie requise pour transformer, transporter et utiliser l'énergie (perte lors de la conversion, infrastructures mises en places, compteurs, etc.).

Pour le pétrole et le gaz, la comptabilisation de l'énergie consommée s'arrête généralement au moment où le pétrole ou le gaz arrivent en tête de puits. On utilise communément l' $EROI_{st}$. Les étapes de transport, de raffinage, de distribution et d'utilisation ne sont pas prises en compte. Aussi, si on imaginait un coût monétaire énergétique pour les impacts environnementaux, ceux-ci ne sont pas pris en compte. Par conséquent, l'EROI réel est souvent plus favorable que les estimations existantes.

⁶⁵ Tremblay, H. (2013). *Le rendement énergétique net: principe cardinal d'une politique québécoise à l'égard des hydrocarbures*. *Revue Internationale D'Études Québécoises*, 16(2), 143-160. doi:10.7202/1025217ar

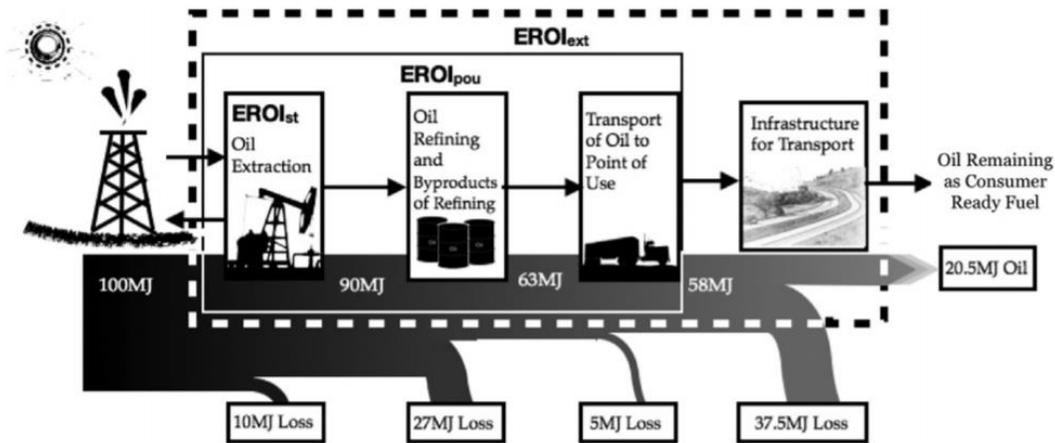


Figure 11. Calcul de l'EROI du pétrole en tenant compte des différentes frontières de calcul

Source: Hall, Lambert, & Balogh, 2014: 141-142⁶⁶

Pour poursuivre l'exemple offert ci-dessus : le raffinage de 200 MJ de pétrole brut nécessite l'investissement de 10 MJ d'énergie directe (électricité par exemple) et l'utilisation de 2 MJ d'énergie indirecte incorporée dans les biens d'équipement. Alors, pour délivrer 190 MJ d'énergie après avoir été raffiné, l'investissement énergétique total est de $10 + 2 + 4 + 4 = 20$ MJ. Par conséquent, l'EROI_{pou} est égal à 9,5:1 ($190/20 = 9,5$). Enfin, si 18 MJ d'énergie sont nécessaires pour construire et entretenir toutes les infrastructures (routes, ponts, voitures, etc.), alors, afin d'utiliser les 190 MJ de produits raffinés, l'EROI_{ext} tombe à 5:1 ($190/(20 + 18) = 5$). » (Court, 2016 :125)⁶⁷ :

⁶⁶ Hall, C., Lambert, J., & Balogh, S. (2014). EROI of Different Fuels and the Implications For Society. Energy Policy, 64, p.142, pages 141-152, doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049

⁶⁷ Court, V. (2016). *Énergie, Eroi Et Croissance Économique Dans Une Perspective De Long Terme* (Doctorat Ès Sciences Économiques). Université Paris Nanterre, Ifp Énergies Nouvelles, Chaire Économie Du Climat.

Figure 12. Un exemple de frontière de calcul d'EROI

Source : Court, 2017 : 7⁶⁸

Par ailleurs, dans la mesure où nous utilisons principalement des énergies de stock, donc limitées, un projet qui utilise de la ressource entre en compétition avec tout autre projet existant et potentiel, dans l'hypothèse « qu'il n'y en aura pas assez pour tous » (Greer, J., 2013). Si l'investissement d'une énergie n'a pas un rendement aussi grand que d'autres projets avec la même demande de ressource au départ, par exemple si un projet de panneaux solaire a un rendement de 10:1 par rapport à un projet de centrales à charbon avec un rendement de 50:1, le projet de panneaux solaires sera écarté par « les forces du marché et les décisions politiques » (Greer, J., 2013 : 131). Ainsi, au-delà de la mesure de l'accessibilité, l'EROI est une mesure pour **comparer** les ressources énergétiques entre elles. Ce concept est similaire aux analyses d'évaluation de coût monétaire : plus le ratio de l'énergie « produite » sur l'énergie investie est grand, meilleur sera le rendement énergétique. La seule différence réside dans l'outil : l'EROI utilise l'unité énergétique (le joule) plutôt que l'unité monétaire (Déry, 2008)⁶⁹.

⁶⁸ Court, V. (2017). *Taux De Retour Énergétique (TRE)* (p. 7, 26 pages). Séminaire HEC Energie. Consulté à l'adresse <https://victor-court.com/>

⁶⁹ Déry, P. (2008). *Quel rendement sur notre investissement énergétique?* (p. 3-8, 20 pages). Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD), Saguenay—Lac-Saint-Jea, Groupe de recherches

C'est donc un concept à utiliser avec précaution pour comparer des rendements énergétiques d'une même énergie (pétrole issu de deux puits différents) ou deux énergies différentes (pétrole et charbon) car chaque projet d'énergie possède un EROI particulier qui dépend du type d'énergie et du mode d'extraction, des facteurs géographiques⁷⁰ et de la limite d'entrée⁷¹ prise en compte pour calculer cet EROI (Court, V. 2016). Par ailleurs, avoir accès à toute l'information concernant l'énergie dépensée pour transformer un type d'énergie reste très difficile. Enfin, certains chercheurs mettent en doute la pertinence de comparer les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables. Dans la littérature, même si il n'est pas une convention universelle, on utilise plutôt l'EROI standard, $EROI_{st}$, appelé EROI. Cependant, comme la littérature n'est pas toujours claire à ce sujet, on utilise une fourchette pour les EROI des énergies.

Par exemple, le charbon, le pétrole et le gaz ont des EROI représentatifs respectifs d'environ 80-100 :1, 20-30 :1 et 40-60 :1 (Court, 2016 :134), C'est-à-dire que 1 MJ de charbon servira à extraire 100 MJ de charbon ($EROI_{st}$) ou bien à raffiner 80 MJ de charbon. D'autres données, comme celles de Heinberg R. et D. Lerch, montrent que le charbon est en moyenne de 50:1, le pétrole de autour de 18:1 et le gaz de 10:1 (2009). Ce qui montre que les données peuvent différer d'une source à une autre.

Enfin, une mesure statistique liée à l'EROI est l'énergie nette. Elle est exprimée en Joules.

écologiques de La Baie (GREB). Consulté à l'adresse http://www.rncreq.org/documents/rapport_energie_volet3.pdf

⁷⁰ La distance entre le lieu d'extraction et le point de consommation est important car il faut dépenser de l'énergie pour construire des infrastructures de transport, les faire fonctionner ou les entretenir, puis tenir compte des pertes énergétiques durant le trajet (Thévard, B. 2013).

⁷¹ Par exemple, le raffinage demande un investissement énergétique important pour la construction des équipements et pour leur fonctionnement (Thévard, B. 2013).

$$\text{Équation (2) } \textit{Énergie nette [Joules]} = \textit{Énergie brute produite} - \textit{Énergie investie}$$

L'énergie nette et l'EROI ont la même interprétation. L'EROI mesure un rapport entre l'énergie produite et l'énergie investie tandis que l'énergie nette nous donne l'énergie restante après le coût énergétique lié au projet. L'énergie nette ne nous donne pas de rapport direct pour comparer les énergies entre elles mais est fondamentale pour connaître l'énergie dont dispose réellement la société pour répondre à ses besoins.

1.2 Quels problèmes posent nos systèmes énergétiques?

Nos systèmes énergétiques reposent dans une large mesure sur des énergies fossiles car elles présentent simultanément trois caractéristiques fondamentales présentées ci-dessous :

- i) Les EF ont un fort rendement énergétique (EROI)
- ii) Elles sont denses
- iii) Elles sont facilement stockables

Mais le problème de base est que: 1) leur usage génère des GES qui sont en train de perturber le climat terrestre de manière dramatique; 2) ces énergies sont maintenant promises à un épuisement assez rapide (à l'échelle de l'histoire de notre civilisation).

1.2.1 Épuisement des énergies non renouvelables

1.2.1.1 Pic pétrolier

Le pic pétrolier est un terme employé pour désigner l'atteinte du point culminant de la courbe de production de pétrole des champs pétroliers existants, qui se traduit par un coût énergétique d'extraction de plus en plus important. Le pétrole non conventionnel comprenant les sables

bitumineux, le pétrole de schiste, le gaz liquéfié ou le charbon liquéfié n'est pas pris en compte. Le premier constat serait que dès les années 70, la production de pétrole conventionnel des puits existants auraient décliné avec un taux de décroissance⁷² annuel estimé par l'AIE de 6,4%, soit 4,8 millions de barils par jour (bpj) (Heinberg, R., et D. Lerch, 2009, 231) :

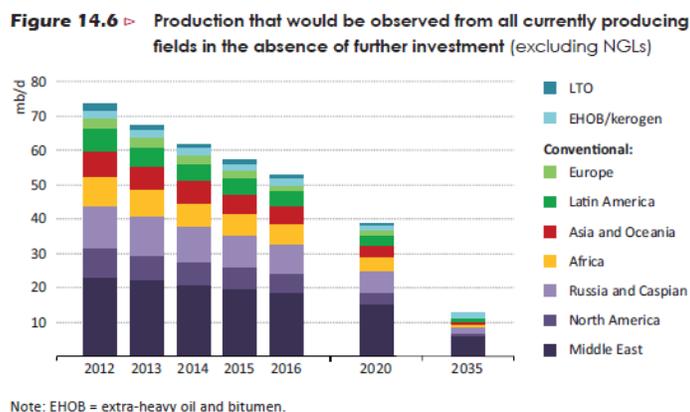


Figure 13. Production pétrolière qui serait observée sans nouvel investissement

Source : Agence internationale de l'énergie [AIE], 2013: 470⁷³

La vraie question qui se pose est la suivante : allons-nous être capables de mobiliser des quantités croissantes de pétrole au rythme actuel afin de répondre à la demande grandissante? On pourrait de manière intuitive penser que le déclin de la quantité présente dans les gisements va être sûrement compensé par la découverte de nouvelles réserves et l'amélioration des techniques de récupération du pétrole. Or le graphique ci-dessous montre que ce n'est pas

⁷² « À partir de l'analyse de 1 600 champs ayant dépassé le pic de production » (Matthieu Auzanneau, 2013).

⁷³ Agence Internationale de l'Energie [AIE]. (2013). *World Energy Outlook 2013* (p. 470, 687 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2013.html>

le cas. Le deuxième constat est que « nous consommons chaque année plus que nous ne découvrons de ressources « physiques » dans le sol » (Jancovici, 2003)⁷⁴.

Figure 14. Production et découverte annuelle de pétrole, en millions de barils,
1930-2050

Source: Jancovici, J., 2014⁷⁵

On pourrait par ailleurs penser que les réserves probables et possibles⁷⁶ deviendront les futures réserves prouvées⁷⁷ une fois celles-ci épuisées, et que puisque les stocks sont immenses, il y

⁷⁴ Jancovici, J. (2003). *Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/quest-ce-quune-reserve-de-petrole/>

⁷⁵ Jancovici, J. (2014). *A quand le pic de production mondial pour le pétrole?* Jean-Marc Jancovici. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/a-quand-le-pic-de-production-mondial-pour-le-petrole/>

⁷⁶ « Les réserves 2P (prouvé + probable) ou réserves ultimes (voir note 68) « correspondent à ce qui sortira de la manière la plus probable du début à la fin de l'exploitation du gisement. C'est une quantité supérieure à celle

en aura encore pour des années. Cependant, la probabilité que la totalité des réserves possibles et probables corresponde à la quantité prouvée est très mince (Jancovici, J., 2013) et, malgré la hausse de la production de pétrole en nombre de barils, l'énergie récupérée est de moins bonne qualité⁷⁸. Celle-ci s'explique par le fait que le pétrole soit « mélangé » à du gaz liquide et à des « condensats composés de molécules légères et procurant moins d'énergie par baril que les chaînes carbonées plus longues » (Jancovici, J. 2015 : 22)⁷⁹. Pour Jancovici, ce n'est pas un problème de disponibilité, mais un problème d'accessibilité. Une mesure pour rendre compte de ce phénomène est la baisse du rendement énergétique des ressources, c'est-à-dire de l'EROI. Cela signifie qu'il faudra plus de barils de pétrole pour en extraire de nouveaux. En d'autres termes, c'est l'énergie nette qui diminue. Le tableau et la figure ci-dessous présentent les résultats de recherche de Cleveland en 1981, 1984 et 2005 présentés dans l'article de Murphy, D., & C. Hall (2010)⁸⁰ et celui de Hall, C., Lambert, J., & S. Balogh (2014)⁸¹. Les

prouvé et c'est généralement sur cette valeur, *non publiée* mais calculée en même temps que le prouvé, que les opérateurs pétroliers prennent leurs décisions d'investissement » (Jancovici, J. 2013). [...]

« Les réserves 3P (prouvé + probable + possible) correspondent à ce qui pourrait sortir « au maximum »; c'est donc la limite supérieure que l'on obtient en mettant tous les paramètres à la valeur la plus favorable possible » (Jancovici, J. 2013).

⁷⁷ « Les réserves prouvées sont les quantités **publiées** qui « se définissent comme la quantité la plus probable à extraire d'un gisement » (Jancovici, J. 2013). [Elles] « ne désignent donc pas la totalité de ce qui existe sous terre, ni même ce qui finira par sortir de la manière la plus probable des réservoirs non encore épuisés mais seulement la fraction de ce pétrole encore sous terre qui sortira de manière certaine ou quasi-certaine des réservoirs exploités **aujourd'hui**, avec les techniques disponibles d'**aujourd'hui** » (Jancovici, J. 2013).

⁷⁸ Dans le secteur pétrolier, l'API est la mesure de gravité de l'institut de pétrole américain *American Petroleum Institute* qui rend compte de la qualité du pétrole brute, c'est-à-dire avant d'être raffiné. Plus l'API est petit, plus lourd est le pétrole et plus la qualité est faible (Geary, E. (2017). *The API gravity of crude oil produced in the U.S. varies widely across states*. Eia.gov. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30852>)

⁷⁹ Jancovici, J. (2015). *Dormez tranquilles jusqu'en 2100* (p. 22, 208 pages). Paris: Odile Jacob.

⁸⁰ Murphy, D., & Hall, C. (2010). *Year in review—EROI or energy return on (energy) invested*. *Annals Of The New York Academy Of Sciences, Ecological Economics Reviews*, 1185(1), 102-118. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x

données montrent que l'EROI du pétrole et du gaz⁸² aux États-Unis a diminué entre 1930 et 2005; qu'on est passé d'environ 100:1 en 1930, à 30:1 en 1970 et de 11 à 18:1 en 2005.

Resource	Year	Magnitude (EJ/yr)	EROI (X:1)	Reference
Fossil fuels				
Oil and gas	1930	5	>100	2
Oil and gas	1970	28	30	1, 4
Oil and gas	2005	9	11 to 18	2

Tableau IV. Évolution de l'EROI du secteur pétrolier et gazier aux U.S.A, en 1930, 1970 et 2005

Source : Murphy & Hall, 2010, 102-118⁸³

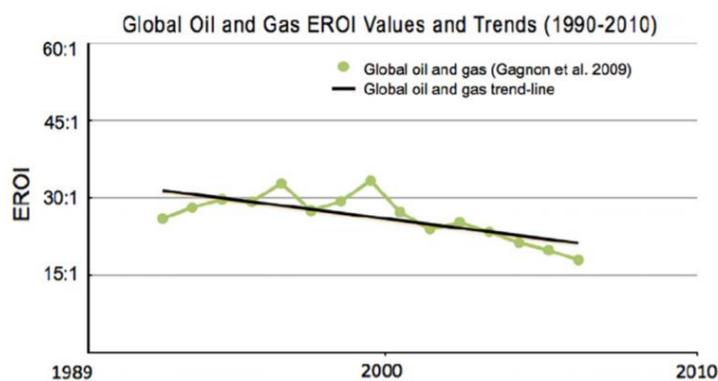


Figure 15. Evolution décroissante de l'EROI du pétrole et du gaz entre 1989 et 2010

Source: Hall, Lambert & Balogh, 2014: 141-152⁸⁴

⁸¹ Hall, C., Lambert, J., & Balogh, S. (2014). *EROI of different fuels and the implications for society*, Energy Policy, 64, 141-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>

⁸² On prend les deux en compte car ils sortent tous les deux du même puits.

⁸³ *Ibid.*, pp 102-118.

La fin du pétrole n'est donc pas une affaire de stock (la déplétion des ressources est encore vaste) mais plutôt une affaire de flux. C'est la difficulté croissante à le « produire » à des rythmes élevés⁸⁵. Les nouveaux champs vers lesquels se sont tournés les investisseurs⁸⁶ ont de plus en plus de mal à compenser le déclin des champs existants, affirme Peter Voser⁸⁷, ancien PDG de Shell.

—*Declining production from conventional oil resources has initiated a global transition to unconventional oil, such as tar sands. Unconventional oil is generally harder to extract than conventional oil and is expected to have a (much) lower energy return on (energy) investment (EROI).*” (Murphy, 2013 :1)⁸⁸

⁸⁴ Hall, C., Lambert, J., & Balogh, S. (2014). *EROI of different fuels and the implications for society*. Energy Policy, p.144, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>

⁸⁵ « Au total la production mondiale [de pétrole] continue de croître à un rythme supérieur à la consommation (3,2 % contre 1,9 %) » (*Production mondiale de pétrole*. (2015). Planète Énergies. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.planete-energies.com/fr/medias/chiffres/production-mondiale-de-petrole>).

⁸⁶ « L'important déclin » de la production des « champs pétroliers anciens » fait en sorte que l'industrie doit investir « massivement » dans des ressources de plus en plus difficiles d'accès et, par conséquent, plus coûteuses (Auzanneau, M. (2015). *Limites de la croissance : cette fois, le loup est là*. Oil Man. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://petrole.blog.lemonde.fr/2015/09/02/limites-de-la-croissance-cette-fois-le-loup-est-la/2/>).

⁸⁷ Dans son discours, l'ancien PDG de Shell, Peter Voser, déclare que pour maintenir la production actuelle de pétrole (équivalente à 95 millions de barils par jour (Mb/j) n 2015) « avant même un quelconque accroissement de la demande », « il faudrait que le monde ajoute l'équivalent de quatre Arabie saoudite (sic) ou de dix mers du Nord dans les dix prochaines années », soit 40Mb/j de production en plus. (Auzanneau, M. (2011). *Shell : il faut quatre Arabie saoudite en plus d'ici dix ans!*. Oil Man. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://petrole.blog.lemonde.fr/2011/09/24/shell-il-faut-arabie-saoudite-en-plus-dici-a-2020/>).

⁸⁸ Murphy, D. (2013). The implications of the declining energy return on investment of oil production. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, 372(2006). doi:10.1098/rsta.2013.0126

Afin d'illustrer la fin de l'ère pétrolière conventionnelle, des chercheurs utilisent la « ressource ultime récupérable⁸⁹ », ou URR, pour désigner la quantité de pétrole que l'Homme sera en mesure d'extraire⁹⁰. Jancovici, l'illustre par une extrapolation des courbes de production futures. Selon tous les scénarios proposés, avec un URR de 3 200 giga barils, correspondant aux réserves prouvées mondiales, on voit que pour le moment, nous sommes encore capables d'augmenter continuellement la quantité de pétrole utilisable. A partir de 2035, ce ne sera plus possible, c'est-à-dire qu'il n'y aura plus assez d'offre pour répondre à la demande, tel que l'indique le tableau ci-dessous :

⁸⁹ La notion de réserves est remplacée par celle de « ressources ultimes récupérables : il s'agit de la somme de ce qui pourrait être extrait de la terre du début à la fin de l'histoire pétrolière et comprend donc :

- les ressources qui ont déjà été produites qui sont évaluées à 1 000 milliards de barils;
- les réserves prouvées (évaluées également autour de 1 000 milliards de barils);
- les réserves probables et possibles qui recouvrent la fraction extractible du pétrole non encore découvert mais qui finira par l'être ainsi que la fraction du pétrole déjà découvert mais non exploitable aux conditions du moment et qui finira par le devenir lorsque la technique aura progressé ou le prix monté. Leur montant est évalué à 1 000 milliards de barils » (Jancovici, J. 2013).

⁹⁰ Waline, C (2017). *La hausse des prix du pétrole : une fatalité ou le retour du politique*. Le Sénat. Consulté le 8 juin 2017 depuis <https://www.senat.fr/rap/r05-105/r05-10513.html>.

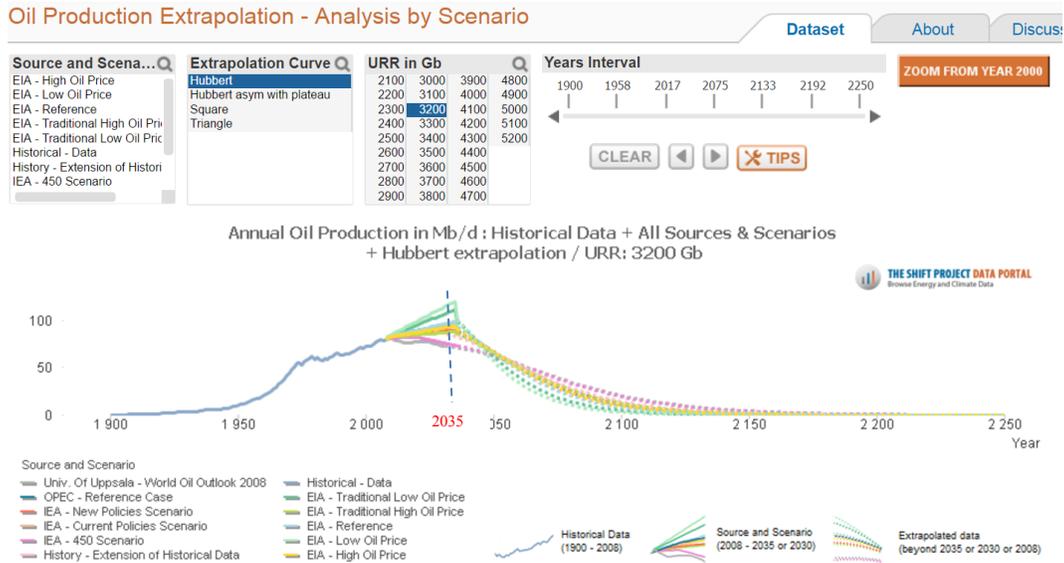


Figure 16. Extrapolation de la production de pétrole selon une ressource ultime renouvelable de 3200 Gb (milliards de barils)

Source: *The Shift Project*, 2017⁹¹

1.2.1.2 Rendement énergétique des autres fossiles inférieurs au pétrole conventionnel

De manière plus générale, la diminution du rendement énergétique montre que nous utilisons des quantités croissantes d'énergie pour extraire une énergie « de plus en plus pauvre », située de plus en plus profond et dont « le coût énergétique augmente très rapidement » (Lovering, 1959, p. 122, cité dans Georgescu-Roegen, 1995 : 72).

La figure ci-dessous présente l'EROI des différentes sources d'énergie (Murphy et al., 2014). Le charbon a l'EROI le plus élevé, entre 40 et 50:1, suivi du pétrole, puis du gaz naturel à 20:1. On pourrait donc remplacer le pétrole conventionnel par du charbon liquéfié⁹² mais on

⁹¹ *Oil Production extrapolation. The Shift Project*. Consulté 4 April 2017, à l'adresse : <http://www.tsp-data-portal.org/Oil-Production-Extrapolation-URR-Analysis#tspQvChart>

⁹² CTL, pour « *coal to liquids* », est une technologie qui permet de « transformer » le charbon en carburants liquides.

ne résoudrait absolument pas le problème des GES, problème que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

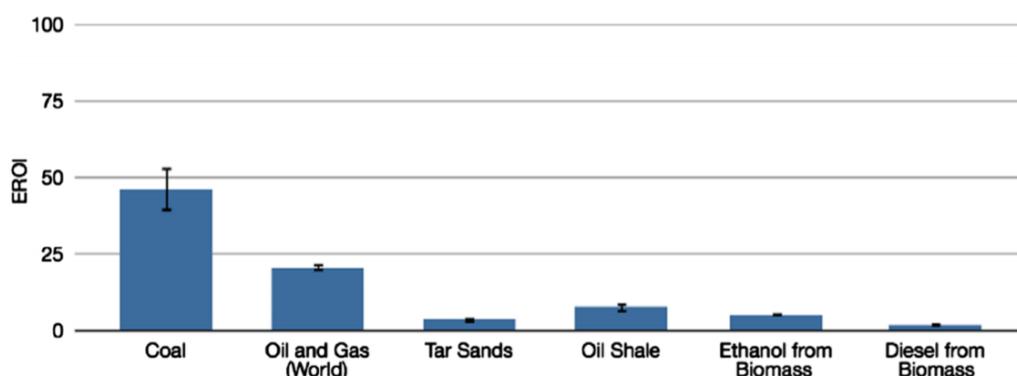


Figure 17. EROI des différentes sources d'énergies fossiles

Source: Hall, Lambert, & Balogh, 2014: 143⁹³

En termes de gaz, le déclin du rendement énergétique a commencé en Europe : « le gaz disponible (la somme de ce qui est produit et de ce qui est importé) baisse d'un peu plus de 1% par an en moyenne depuis 2005 » (Jancovici J., 2015 : 24). Quant au charbon, même si pour certains les réserves existent en abondance, d'autres postulent que la baisse de son EROI est éminente compte tenu « d'un coût énergétique exponentiel croissant lié « à la raréfaction des gisements les plus riches et les plus accessibles⁹⁴ » (Roegen, 1995 : 13).

Comme le montre la figure ci-dessus, le pétrole non conventionnel tel que les sables bitumineux d'Alberta au Canada ne pourrait pas jouer le rôle de substitut en termes de rendement énergétique, celui-ci étant trop faible par rapport à celui du pétrole conventionnel.

⁹³ Hall, C., Lambert, J., & Balogh, S. (2014). *EROI of different fuels and the implications for society*. Energy Policy, p.143, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>

⁹⁴ Une quantité utilisable signifie que nous devons disposer d'une quantité de pétrole supérieure ou égale pour extraire la même quantité. Elle sera utilisable mais non accessible.

Même en termes de quantité, les sables bitumineux ne pourraient aujourd'hui répondre à l'offre mondiale. La production maximale de sable bitumineux en 2020 est en effet estimée à 4 millions de bpj (PCI, 231), ce qui reste en deçà de la demande, estimée à 97 millions bpj⁹⁵.

En somme, l'aporie du système révèle que face à l'épuisement des ressources fossiles :

- i) Nous avons épuisé toutes les ressources de qualité et facilement accessible
- ii) Hormis le charbon dont le déclin approche, nous sommes à la chute vertigineuse, et sans solution accessible comme, du EROI des dites ressources
- iii) Nous maintenons notre rythme effréné de demandes énergétiques

Force est de constater, donc, que nos systèmes énergétiques ne tarderont pas à buter sur de sérieuses limites.

1.2.2 Gaz à effet de serre et dérèglement climatique

1.2.2.1 Gaz à effet de serre

—Anthropogenic greenhouse gas emissions have increased since the pre-industrial era, driven largely by economic and population growth, and are now higher than ever. This has led to atmospheric concentrations of carbon dioxide, methane and nitrous oxide that are unprecedented in at least the last 800,000 years. Their effects, together with those of other anthropogenic drivers, have been detected throughout the climate system and are extremely likely to have been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century” (IPCC, 2014 : 4).

⁹⁵ IEA. (2017). *Oil. Iea.org*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.iea.org/about/faqs/oil/>

Les gaz à effet de serre⁹⁶ sont les constituants gazeux de l'atmosphère, d'origines naturelle et anthropogènes. Ces gaz piègent la chaleur en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre⁹⁷, l'atmosphère et les nuages, et contribuent à l'effet de serre⁹⁸ : Le principe de l'effet de serre terrestre est le suivant. Tout corps isolé dans l'espace et dont la composition ne varie pas émettra « exactement autant de rayonnement qu'il en reçoit de l'extérieur » (Jancovici, 2003)⁹⁹. Et si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente. Notre planète peut être vue comme un corps isolé recevant de l'énergie par les radiations solaires. Comme elle gagne de l'énergie, sa température augmente. Comme sa température augmente, ses émissions infrarouges¹⁰⁰ augmentent à leur tour. Or, ces rayonnements sont piégés par les GES, qui les absorbent et les réémettent.

⁹⁶ Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃).

⁹⁷ Ainsi, la Terre (surface et atmosphère) émet un rayonnement infrarouge (entre 5 et 100 micromètres). Ce rayonnement est émis vers l'espace; il représente donc une perte d'énergie pour la Terre. (*Bilan radiatif de la Terre - Rayonnement infrarouge émis*. Eduscol.education.fr. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/climat/pistpeda/bilanrad/bilan5.htm>)

⁹⁸ Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement infrarouge, émis par la surface de la Terre et l'atmosphère (les nuages et ces même gaz émettent à leur tour des rayonnements infra rouges). Ainsi, ces gaz à effet de serre « piègent » la chaleur dans le système surface-troposphère (partie basse de l'atmosphère). C'est ce qu'on appelle, à l'image « des vitres d'une serre » serre, l'effet de serre naturel (Jancovici, J. (2003). *Qu'est-ce que l'effet de serre?* Jean-Marc Jancovici. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/quest-ce-que-leffet-de-serre/>)

⁹⁹ Jancovici, J. (2003). *Pourquoi dit-on que la planète se réchauffe?* Jean-Marc Jancovici. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/pourquoi-dit-on-que-la-planete-se-rechauffe-2/>

¹⁰⁰ La Terre émet des rayonnements infrarouges car sa température en surface est inférieure à 700°C. Ces rayonnements sont invisibles à l'œil nu ((*Bilan radiatif de la Terre - Rayonnement infrarouge émis*. Eduscol.education.fr. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/climat/pistpeda/bilanrad/bilan5.htm>)

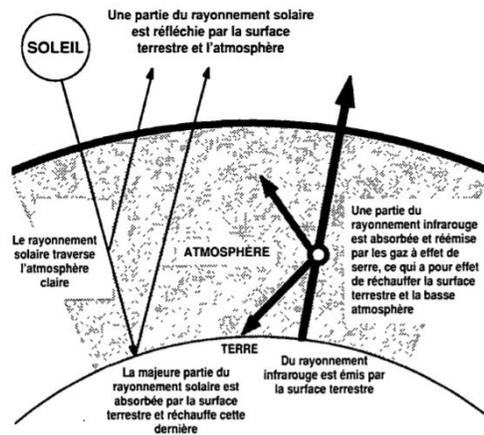


Figure 18. Principe de la production de GES schématisé

Source : IPCC 1992 : 8

Produits massivement par les activités humaines, ces gaz « renforcent l'effet de serre », et engendrent un déséquilibre appelé « réchauffement climatique ».

1.2.2.2 Réchauffement climatique

Le réchauffement climatique (RC) est l'augmentation de la température globale sur Terre. Il est provoqué par une modification du bilan énergétique de la planète, engendrée en partie par les GES (IPCC, 2013). Le 5^e rapport politique¹⁰¹ du GIEC, que nous évoquons précédemment, établit la cause physique du RC. Il serait dû à l'accumulation trop importante des gaz à effet de serre, accumulation débutée à l'époque préindustrielle et provenant principalement du secteur énergétique (émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et de dioxyde d'azote (N₂O) dues à la combustion des énergies fossiles et au torchage

¹⁰¹ Il y a une différence entre le rapport scientifique et le rapport politique, qui résume les faits.

de gaz¹⁰²), du secteur de production de ciment¹⁰³ (principalement du CO₂) et des activités industrielles rejetant du CFC¹⁰⁴ :

La force de ces GES est « quantifiée sous forme d'un forçage radiatif (FR) en watts par mètre carré (W. m⁻²) » (IPCC, 2013 :13). Un FR positif « entraîne un réchauffement de la surface », tandis qu'un FR négatif « provoque un refroidissement de la surface » (IPCC, 2013 :13). Le GIEC a étudié le forçage radiatif en 2011 relativement à 1750. Le FR anthropique total est passé de 1,13 W. m⁻² en 1750 à 3,33 W.m⁻² en 2011. Il a donc triplé en 250 ans, ce qui, d'après les études, montre un réchauffement climatique. Pour comparer les différents « potentiel de réchauffement global » (PRG), le CO₂, qui est le gaz au plus haut forçage radiatif (IPCC, 2013) et qui constitue le principal gaz rejeté lors de la combustion des énergies fossiles, est pris comme mesure de référence. Afin de mesurer l'impact des différents GES, ceux-ci sont convertis en **équivalent CO₂**. Par exemple, un gramme de méthane CH₄, dont le PRG est

¹⁰² « Lorsque l'on extrait du pétrole, celui-ci remonte souvent à la surface, accompagné d'eau et de gaz (dit « gaz associé ») ». Afin d'éviter de rejeter ce gaz directement dans l'atmosphère – « ce qui est la pire des solutions car on remet directement dans l'atmosphère du méthane, gaz à effet de serre au potentiel de réchauffement 30 fois supérieur à celui du CO₂ » – on le brûle, afin d'émettre du CO₂, moins polluant que le méthane. Cette opération s'appelle torchage (ou « flaring » en anglais) (*Pourquoi « torche »-t-on du gaz?* (2015). Connaissance des Énergies. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.connaissancedesenergies.org/pourquoi-torche-t-du-gaz-150408>).

¹⁰³ Le ciment est fabriqué à partir d'un mélange de calcaire et d'argile extraits de carrières. « Le mélange est chauffé dans un four à 1 450°C pour obtenir du « clinker ». Une fois broyé, le clinker devient le ciment. Pour obtenir cette température, il faut que les flammes atteignent 2 000°C ». Or, pour atteindre une telle température, il faut un apport énergétique très important, seulement rendu « possible grâce à des carburants fossiles (essence, kérosène ou diesel) », émetteurs de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. « Le procédé contribue ainsi à l'effet de serre, et donc au réchauffement climatique. » *Pourquoi la fabrication du ciment participe-t-elle au réchauffement climatique?* Futura-Sciences. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-fabrication-ciment-participe-t-elle-rechauffement-climatique-4090/>

¹⁰⁴ « La source la plus importante d'émissions de gaz à effet de serre imputables aux activités industrielles ne faisant pas intervenir l'énergie est la production et l'utilisation de CFC et autres halocarbones » (IPCC, 1992 : 132).

23 fois supérieur à celui d'un gramme de CO₂ sur une période de 100 ans¹⁰⁵, sera égal à 23 grammes de CO_{2eq}. Le tableau ci-dessous résume les PRG des gaz à effet de serre connus¹⁰⁶ :

	CO ₂	Méthane	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
Concentration dans l'atmosphère	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
Époque pré-industrielle (1750-1800)	280	0,8	0	0	288
Époque actuelle (1990)	353	1,72	280	484	310
Taux de variation annuel actuel	1,8 (0,5 %)	0,015 (0,9 %)	9,5 (4 %)	17 (4 %)	0,8 (0,25 %)
Durée de vie dans l'atmosphère (années)	(50-200)†	10	65	130	150

ppmv = Parties par million en volume,

ppbv = Parties par milliard en volume,

pptv = Parties par billion (million de millions) en volume

† La manière dont le CO₂ est absorbé par les océans et la biosphère ne peut se décrire de manière simple et on ne peut l'exprimer par une valeur unique (prière de se reporter au rapport principal pour plus de détails)

Tableau V. Durée de séjour et PRG des principaux gaz à effet de serre

Source IPCC, 1992 : 74

Concernant la quantité de CO₂ produite par une tep de combustible fossile, celle-ci dépend de sa composition chimique, plus précisément des proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène de ses molécules. L'ADEME et Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités (2010)

¹⁰⁵ Gagnon, L. (2003). *Émissions de gaz à effet de serre* (p.2, 8 pages). Montréal: Hydro-Québec, direction – Environnement. Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf

106

¹⁰⁷ a retenu les coefficients d'émission moyens suivants (en tonne de carbone par tep) pour le charbon, le pétrole et le gaz naturel :

	kgCO ₂ /GJ	PCI (GJ/tonne)	kgCO ₂ /tep (PCI)	gCO ₂ /kWh
Essence	73	44	3 066	264
Gazole/FOD	75	42	3 150	271
Fuel lourd	78	40	3 276	282
Gaz naturel	57	49,6	2 394	206
Kérosène	74	44	3 108	267
Charbon	95	26	3 990	343
GPL	64	46	2 688	231
Déchets ménagers	41,3	8,8	1734,6	149

Tableau VI. Coefficient d'émission des principales sources d'énergies fossiles

Source : ADEME, 2010 : 59¹⁰⁸

Ce tableau indique que la combustion d'une tep de gaz naturel n'émet que 60% du CO₂ produit par une tep de charbon ce qui montre que selon la ressource naturelle utilisée pour produire de l'énergie, les émissions de GES varient.

Par ailleurs, le tableau ci-dessous donne une idée générale des ressources les plus polluantes, en donnant comme résultat la quantité de CO₂ équivalent, en kilo tonnes, pour un TWh d'électricité produite.

¹⁰⁷ ADEME, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités. (2010) *Guide des facteurs d'émissions - Version 6.1 Chapitre 2 – Facteurs associés à la consommation directe d'énergie* (p. 59, 69 pages). Consulté à l'adresse http://23dd.fr/images/stories/Documents/PV/Ademe_Metro_Chapitre_2_Energie.pdf

¹⁰⁸ *Ibid.*, p59.

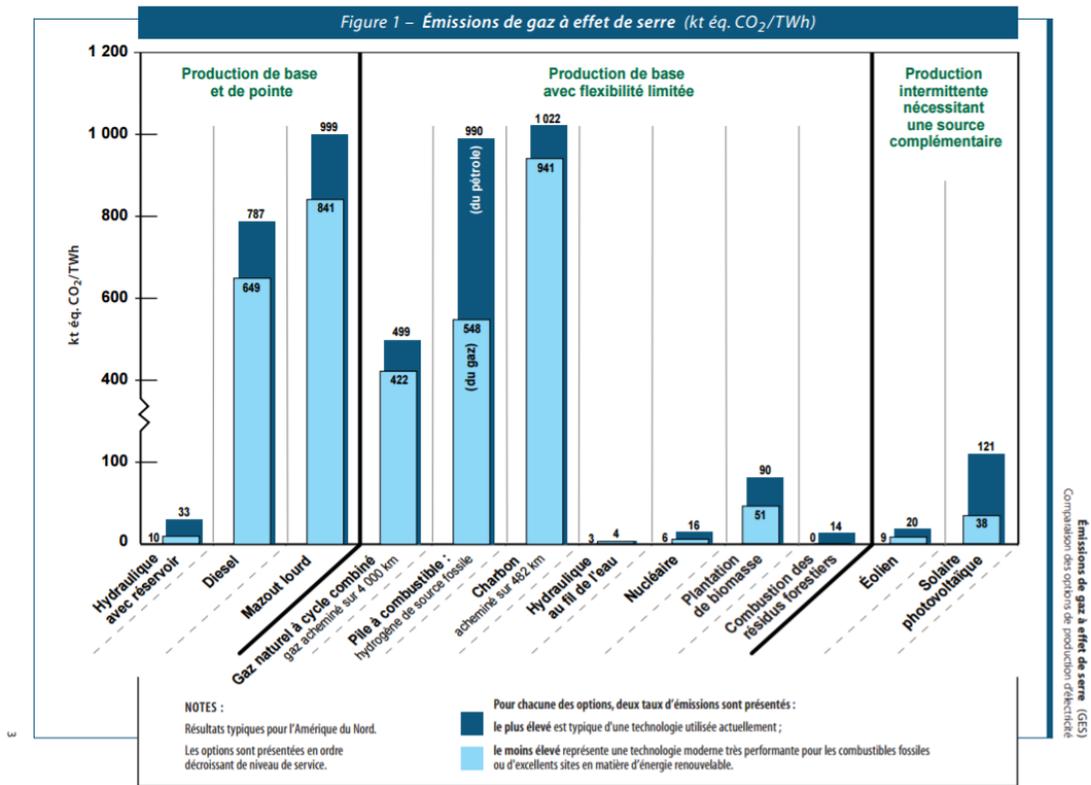


Figure 19. Taux d'émission de gaz à effet de serre (kt.eq.CO₂/TWh) produit

Source : Gagnon, 2003 : 2¹⁰⁹

Concernant les rejets de GES du pétrole, ils dépendent du type de ce dernier. Respectivement, le mazout lourd reste le plus polluant, suivi du diesel. Pour les autres combustibles ce sont respectivement le charbon, l'hydrogène de source fossile et le gaz naturel à cycle combiné qui rejettent le plus de GES, situé autour de 400 kt CO_{2eq}/TWh pour le gaz et pouvant dépasser 1000 kt CO_{2eq}/TWh pour le charbon.

Le charbon est en effet un combustible fossile très polluant¹¹⁰ et « constitue une menace majeure pour notre climat [...] À elle seule, une centrale au charbon d'une capacité de

¹⁰⁹ Gagnon, L. (2003). *Émissions de gaz à effet de serre* (p.2, 8 pages). Montréal: Hydro-Québec, direction – Environnement. Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf

150 mégawatts produit plus d'un million de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre par année, soit autant que 300 000 voitures¹¹¹ ».

Le gaz naturel contribue également au changement climatique, mais sa combustion produit moins d'émissions de gaz à effet de serre que celle du charbon ou du pétrole, soit près de 2,5 fois moins d'émissions par unité d'électricité générée, d'après la figure ci-dessus. L'enjeu majeur du gaz est l'impact environnemental produit lors de son extraction (Suzuki, 2011¹¹²) et des pertes, fuites et combustion incomplète qui émettent du CH₄ (Matthews & Chavaillaz, 2017)¹¹³.

1.2.2.3 Effets du réchauffement climatique

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des

¹¹⁰ Une centrale à charbon est aussi « émettrice de « substances toxiques » qui provoquent : problèmes respiratoires, irritations, inflammations, dommages causés aux poumons ainsi que morts prématurées. » *Le charbon*. (2014). Fondation David Suzuki. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-dintervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/le-charbon/>

¹¹¹ Fondation David Suzuki (2014). *Le charbon*. Fondation David Suzuki. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-dintervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/le-charbon/>

¹¹² Fondation David Suzuki (2011). *Le gaz naturel n'est pas la solution*. Fondation David Suzuki. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.davidsuzuki.org/fr/blogues/la-science-en-action/2011/07/le-gaz-naturel-nest-pas-la-solution/>

¹¹³ Matthews, D., & Chavaillaz, Y. (2017). In *Gaz naturel - une énergie de transition* (p. 60, 98 pages). Montreal: Collectif scientifique sur la question du gaz de schiste. Consulté à l'adresse <http://www.collectif-scientifique-gaz-de-schiste.com/accueil/index.php/conferences/conferences-du-collectif/2017>

millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté » (IPCC, 2013 :4).

Les incidences potentielles liées aux CC sur l'équilibre écologique de la planète¹¹⁴ auront pour effet d'amplifier la vitesse et le nombre de phénomènes écologiques inter-reliés tels l'augmentation de la périodicité des tempêtes, l'intensité des inondations et des périodes de sécheresse due à la perturbation du cycle de l'eau (IPCC, 2013: 20). La fonte de la calotte glaciaire amplifiera l'effet de réchauffement climatique (IPCC, 2013: 26) qui participera à son tour à la fonte du pergélisol¹¹⁵. Tout comme l'acidification des océans qui « continuera de piéger du carbone » (IPCC, 2013 :26), ce phénomène amplifiera l'accroissement du CO₂ atmosphérique » (IPCC, 2013 :26). Ces phénomènes devraient avoir un impact sur l'agriculture, la santé humaine et menaceraient la survie de l'espèce humaine, incapable de s'adapter à de tels changements, aussi rapidement.

1.2.2.4 Trajectoire RCP 2,6 du GIEC

Pour élaborer une solution au problème, le groupe de travail II, dans le Résumé à l'attention des décideurs publié en 2014, utilise des profils représentatifs d'évolution de concentration¹¹⁶

¹¹⁴ Les CC vient perturber la température (IPCC, 2013 : 20), le cycle de l'eau (IPCC, 2013 :20), la qualité de l'air, (IPCC, 2013 :21), les océans (IPCC,2013 :20), la cryosphère (IPCC,2013 :24), l'élévation du niveau des mers (IPCC,2013 :25), le cycle du carbone et les autres cycles bio-chimiques (IPCC,2013 :26).

¹¹⁵ « Dans un climat en proie au réchauffement, la fonte du pergélisol peut induire la décomposition du carbone accumulé dans les sols gelés, qui pourrait persister des centaines, voire des milliers d'années, entraînant une augmentation des concentrations de CO₂ et/ou de méthane (CH₄) dans l'atmosphère. » (IPCC, 2013: 70)

¹¹⁶ Il y a quatre scénarios RCP dont le chiffre correspond au forçage radiatif atteint en 2100. Le scénario RCP2.6 correspond au scénario avec à un forçage de 2,6 W/m² en 2100, le scénario RCP4.5 à 4,5 W/m², idem pour les scénarios RCP6 et RCP8.5 (Wayne, G. (2013). *Now available: a guide to the IPCC's new RCP emissions pathways*. The Guardian. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-per-cent/2013/aug/30/climate-change-rcp-handy-summary>

(RCP) décrivant quatre profils de développement des émissions atmosphériques GES différents pour le XXI^e siècle, dépendamment des « politiques climatiques et du développement socio-économique » depuis 1980 jusqu'à 2100 (IPCC, 2014 : 8). La figure ci-dessous présente le taux d'émissions de CO_{2eq}, représenté en taux cumulés, dont l'unité est le « partie par million » (ppm), et en taux d'émissions annuel de CO_{2eq}, en gigatonnes de CO_{2eq} par année.

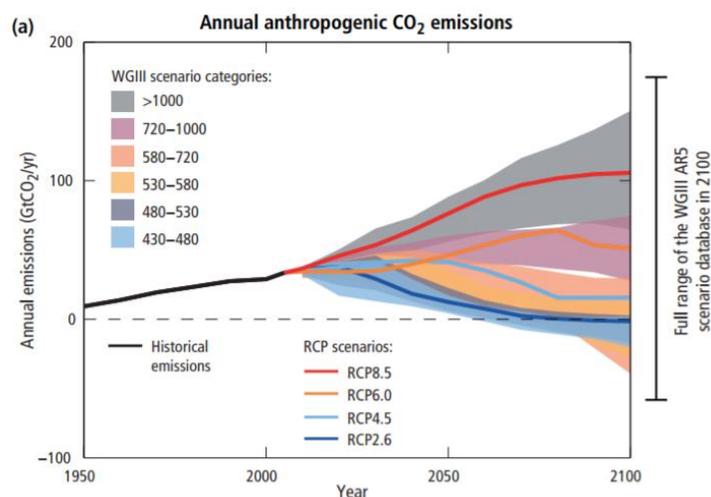


Figure 20. Tableau, Différents scénarios calculés par le GIEC selon le taux de GES

Source: IPCC, 2014 : 9

Pour avoir une chance de ne pas créer de cataclysme écologique, le groupe de travail II de l'IPCC, supporté par le PNUD, postule que le RC ne doit pas dépasser 2° Celsius entre le début et la fin du 21^{ème} siècle.

Le seul RCP représentatif d'un scénario visant un réchauffement planétaire qui aurait 50% de chance (OECD and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012 : 1) de demeurer en-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels est le RCP 2,6. Dans ce scénario, la concentration cumulative de CO_{2eq} à ne pas dépasser dans l'atmosphère se situe

entre 430 et 480 ppm (médian à 450 ppm) jusqu'en 2100. La dernière mesure date d'avril 2017, enregistrée à 406,17 ppm. « Les scénarios visant ces concentrations d'ici 2100 se caractérisent par une réduction mondiale de 40 à 70 % des émissions anthropiques de GES entre 2010 et 2050 » (IPCC, 2014, 20). Pour ne pas franchir ce seuil, la disparition complète des émissions de GES anthropogéniques doit être effective d'ici 2100. Pour ce faire, les émissions de GES du secteur de l'approvisionnement énergétique devraient diminuer de manière drastique au cours des prochaines décennies¹¹⁷ :

« Il est impératif de faire chuter les émissions mondiales de CO₂ à 20 milliards de tonnes par an à l'horizon 2040, soit une division par deux par rapport à leur niveau actuel (36 milliards de tonnes), sachant qu'elles grimperont à 47 milliards de tonnes si les rejets de gaz à effet de serre se poursuivent au rythme actuel » (Le Hir, P., 2017)¹¹⁸

L'année de base des calculs étant l'année 2010, année à partir de laquelle la concentration cumulée de CO₂eq dans l'atmosphère a dépassé « 49 ± 4,5 GtCO₂-eq/yr » (IPCC, 2014 : 5), cette diminution devrait se caractériser par les statistiques rassemblées dans le tableau suivant :

Objectifs de Réduction des GES selon le RCP 2,6	Par rapport à 1990	Par rapport à 2010
Rythme de croissance des GES	< 2 ppm / an	49 ± 4,5 GtCO ₂ -eq/yr ou >2,3 ppm/ an ¹¹⁹

¹¹⁸ Le Hir, P. (2017). *Climat : comment réduire de moitié les émissions mondiales de CO₂ en 2040*. Le Monde.fr. Consulté 3 août 2017, à l'adresse http://www.lemonde.fr/energies/article/2017/04/25/climat-comment-reduire-de-moitie-les-emissions-mondiales-de-co2-en-2040_5116891_1653054.html#MRjmTiirHgcD3lab.99

¹¹⁹ ChangementsClimatiques.org. (2012). *390 ppm: la concentration de CO₂ dans l'atmosphère franchit un nouveau cap*. ChangementsClimatiques.org. Consulté 3 août 2017, à l'adresse

2020	-25% à -40% ¹²⁰	N/A
2030	N/A	N/A
2050	N/A	-40 à -70% ¹²¹
2040 - 2070	N/A	-90% ou plus ¹²²
2100	100% ¹²³	-78 et -118%
	FR= 2,6 W.m ⁻² // RC < +2°C // CO _{2eq} < 450 ppm	

Tableau VII. Objectifs de Réduction des GES selon le RCP 2,6

1.2.2.5 Recours à la géo-ingénierie et au stockage et captage du carbone

La trajectoire RCP 2,6 comporte « un dépassement temporaire » de la concentration atmosphérique de 450ppm et nécessiterait le recours à de la « géo-ingénierie », qui se définit comme « un vaste ensemble de méthodes et de techniques visant à modifier délibérément le système climatique pour atténuer les effets de l'évolution du climat » (IPCC, 2013 : 149). Par exemple, on pourrait forcer nos océans à emmagasiner du CO₂ par l'ajout de fertilisant par exemple. Dans le prolongement de ces idées, la gestion du rayonnement solaire sur terre est envisagé, dont le but serait « d'accroître la réflectivité de la planète » afin diminuer le réchauffement (IPCC, 2013 : 164). Pour ce faire, certains chercheurs explorent l'idée

<https://changementsclimatiques.org/2012/01/09/390-ppm-la-concentration-de-co2-dans-latmosphere-franchit-un-nouveau-cap/>

¹²⁰ Netherland Environmental Assesment Agency & ECOFYS. (2009) (p. 5, 22 pages). Bonn. Consulté à l'adresse https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/emission_reductions_for_stabilizing.pdf

¹²¹ IPCC, 2014 : 20

¹²² *Ibid.*, p.28

¹²³ *Ibid.*, p. 28

d'éliminer les nuages ou de déployer des miroirs dans l'espace « afin de réfléchir le rayonnement solaire » (IPCC, 2013 : 149)

Mais la disponibilité et la possibilité d'étendre ces techniques et méthodes demeurent incertaines (IPCC, 2014 : 21). La gestion du rayonnement solaire semble difficilement concevable, difficilement réaliste et réalisable. Au-delà de l'immense coût que cela pourrait demander, cette technique pourrait se révéler dangereuse dans le sens où une telle modification sur notre environnement pourrait, on l'imagine aisément, ne pas être maîtrisée. Nous écartons donc cette hypothèse dans notre mémoire, car nous ne pensons pas qu'elle soit une solution qui s'intègre dans le cadre d'une transition énergétique soutenable.

D'autre part, l'AIE met de l'avant la technique de captage et de stockage du carbone par un procédé biologique avec un boisement à grande échelle ou par un procédé industriel lors de la combustion des combustibles fossiles dans les centrales thermiques. Pour ce dernier, le principe est de séparer les molécules de CO₂ des autres molécules, et d'enfouir ces quantités de CO₂ sous terre. Ainsi, on pourrait continuer à mobiliser de l'énergie fossile sans émettre de CO₂ dans l'atmosphère.

–By 2040 in the 450 Scenario, coal accounts for only 16% of the world's energy mix and 12% of electricity output. CCS plays an important role in reducing emissions from coal-fired generation, with three-quarters of the coal-based power coming from plants equipped with CCS.” (IEA, 2015: 274).

Mais cette technique est très coûteuse. Particulièrement pour procéder à la séparation des molécules de CO₂ des autres molécules comme l'azote. Mais au-delà de ce coût énergétique, c'est le risque associé au stockage du carbone enfoui sous terre, dont on ne connaît pas les effets à longs termes pour les futures générations. Surtout, cette stratégie – qui par ailleurs pourraient émettre l'idée saugrenue de pouvoir alors jouir de nos capacités à mobiliser notre énergie fossile sans émettre de GES dans l'atmosphère – ne tient pas compte de l'épuisement des ressources fossiles. Ainsi cette technique n'est pas toujours soutenue par les politiques

énergétiques, tel que le plan de transition énergétique allemand. Dans ce mémoire, nous choisissons aussi d'écarter cette technique qui selon nous n'est pas une solution soutenable de transition.

Le secteur de l'énergie joue « un rôle vital » dans le « développement et le bien-être économique » de nos sociétés (IPCC, 1992 :138). Or l'EROI de ces ressources diminuent et leur mobilisation « entrent pour environ de moitié dans le forçage radiatif résultant des activités humaines » (IPCC, 1992 :138) ce qui engendre un réchauffement climatique. Force est donc de reconnaître que l'épuisement de ressources fossiles et leur grande responsabilité dans le réchauffement climatique nécessite une transition énergétique.

1.3 En quoi consiste la transition?

1.3.1 Définition

« Les politiques énergétiques doivent être conçues de manière à assurer une croissance continue tout en préservant l'environnement global pour les générations à venir. Malheureusement, il n'existe pas de solution technique toute prête pour limiter les émissions de gaz à effet de serre imputables au secteur de l'énergie. Une stratégie globale s'impose, qui devra viser en priorité à améliorer le rendement de l'énergie (production et consommation), et privilégier la recherche technologique, ainsi que l'élaboration et l'application de techniques appropriées » (IPCC, 1992 :138).

À première vue, la transition énergétique, étudiée dans une perspective politique, repose sur des **solutions technologiques** et **ne remet pas en question la croissance économique**.

Pour le programme ODD7 des Nations Unies, la transition énergétique s'inscrit dans une perspective de **développement durable**, qui se définit comme « le passage d'un modèle

économique fortement consommateur d'énergies à un modèle plus sobre et plus durable »¹²⁴. La notion de durabilité se réfère ici à la définition établie lors du rapport de Brundtland, c'est-à-dire « répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs »¹²⁵ (Gouvernement du Québec, 2017). Dans cette optique, le PNUD y répond avec son objectif de développement durable à l'échelle mondiale :

« L'année 2015 a marqué un tournant décisif dans le débat mondial consacré à l'énergie lorsque l'un des objectifs de développement durable adoptés cette année (en particulier, l'objectif 7) a traité de la nécessité de garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable, d'accroître la part des énergies renouvelables et d'améliorer l'efficacité énergétique en développant les technologies. Plus précisément, l'ODD comprend des cibles pour l'accès universel, l'essor des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la coopération internationale dans le développement d'une infrastructure énergétique ainsi que les mises à jour des technologies et l'extension des systèmes énergétiques. » (ONU, 2016)¹²⁶

Le PNUD ne remet pas non plus en question le maintien de notre niveau de vie. Il conçoit la transition comme la coordination entre « la production et la consommation de biens et services afin que les deux ne nuisent pas à l'environnement et que l'offre puisse « répondre aux besoins de la population pour leur offrir un niveau de vie décent » (Gignac, R., & B. Schepper, 2015 :

¹²⁴ SITA. (2016). *Qu'est-ce que la transition énergétique?* - SITA. [En ligne]. Consulté le 5 décembre 2016 depuis <http://www.sita.fr/transition-energetique/definition-transition-energetique/>

¹²⁵ *Développement durable : définition et objectifs.* (2017). *Mddelcc.gouv.qc.ca*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/definition.htm>

¹²⁶ ONU (2016). *L'objectif de développement durable relatif à l'énergie et les technologies de l'information et de la communication* | Chronique ONU. *Unchronicle.un.org*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://unchronicle.un.org/fr/article/l-objectif-de-d-veloppement-durable-relatif-l-nergie-et-les-technologies-de-l-information--0>

7)¹²⁷ en offrant à chacun l'accès à « des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable »¹²⁸.

On comprend alors que la transition énergétique, au niveau international, est une stratégie de sortie des fossiles par l'appui de solutions techniques « propres » proposé par l'expertise de grandes organisations consacrée à ces enjeux, telle que le GIEC. Qu'elle est mise en pratique par des politiques énergétiques qui obéissent aux propositions de ces experts de manière à préserver à la fois l'environnement et la croissance économique. Cette dernière est nécessaire car elle est le fruit du progrès linéaire infini qui permet le « progrès technique » (Audet, R. 2015 : 31)¹²⁹, et dont « la dynamique de marché » (Audet, R., 2015, 58) qu'elle soutient permettra d'accomplir. Aucune forme de « décroissance » n'est donc visée.

¹²⁷ Gignac, R., & Schepper, B. (2015). *Au-delà du jeu des comparaisons, une approche fondée sur la science et l'équité : le budget carbone du Québec* (p. 7, 23 pages). Institut De Recherche Et D'informations Socio-Économiques [IRIS].

¹²⁸ ONU (2015). *Objectif 7 Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable* | *Chronique ONU*. [Unchronicle.un.org](https://unchronicle.un.org/fr/article/objectif-7-garantir-l-acc-s-de-tous-des-services-nerg-tiques-fiables-durables-et-modernes--0). Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://unchronicle.un.org/fr/article/objectif-7-garantir-l-acc-s-de-tous-des-services-nerg-tiques-fiables-durables-et-modernes--0>

¹²⁹ Audet, R. (2015). *Pour une sociologie de la transition écologique* (p. 31, 175 pages). Montréal: Athéna éditions.

1.3.2 Le pari d'un découplage croissance économique/impact écologique?

1.3.2.1 Définition de base de la croissance économique

1.3.2.1.1 *La croissance économique est une création de valeur ajoutée croissante*

L'économie se définit comme la science étudiant l'allocation optimale de nos ressources limitées (Mankiw & Taylor, 2011 : 4)¹³⁰. Pour utiliser ces ressources, l'homme a besoin de les transformer. C'est ce qu'on appelle la production. La production consiste à transformer des ressources naturelles et des biens en d'autres biens et services. Une définition plus contemporaine de la production pourrait consister à dire que celle-ci sert à transformer des ressources matérielles (ressources naturelles) et des ressources immatérielles¹³¹ (Louzzani, 2013)¹³², ces dernières étant définies comme le savoir et les connaissances, en d'autres biens et services.

Pour transformer ces ressources, on fait appel au capital productif : le capital humain (le travail humain, les compétences et connaissances) et le capital physique (machine, équipements, structures) (Mankiw & Taylor, 2013 : 681). Ainsi, tous les biens et services utilisables par l'homme (huile de massage, par exemple) proviennent d'abord d'un flux de matière et d'énergie qui part de ressources naturelles (pétrole, plantes, produits chimiques) transformées par des systèmes énergétiques (raffineries, usine chimiques) et des hommes. Le

¹³⁰ Mankiw, N., & Taylor, M. (2011). *Principes de l'économie* (2e éd., p. 4). Bruxelles: De Boeck.

¹³¹ L'immatérialité n'est toutefois pas une notion que l'on retrouve dans les principaux manuels d'économie.

¹³² Louzzani, Y. (2013). Rôle déterminant des ressources immatérielles dans la création de valeur dans une PME agroalimentaire de terroir. *Revue Internationale P.M.E. : Économie et gestion de la petite et moyenne entreprise*, 26(2), 81. Doi :10.7202/1024322ar

terme flux de matière et d'énergie sera dorénavant appelé « *throughput* », terme introduit par l'économiste Herman Daly, du courant de pensée de l'économie écologique (Harris & Roach, 2017 : 9).

Dès lors que l'on parle de croissance économique, on fait référence à la valeur ajoutée¹³³ créée par la production. Pour passer du système énergétique au système économique, on a attribué une valeur marchande au produit/service obtenu. Par exemple, le produit d'huile de massage se vend à 27 dollars (on pourrait dire que c'est sa valeur) et son coût (de fabrication) est probablement inférieur. Quant au service produit par l'esthéticienne (l'application de l'huile de massage), celui-ci coûtera plus cher, soit 54 dollars. De ce fait, la croissance économique¹³⁴ se définirait comme la croissance de la valeur ajoutée des biens et services produits suite à la transformation des ressources matérielles et énergétiques (*throughput*) et des ressources immatérielles d'une année à l'autre.

Deux facteurs peuvent jouer sur la croissance de la valeur monétaire ajoutée des biens et services :

1 / Le **volume de la production de ces biens et services**, ayant une valeur monétaire, par habitant ou pour une collectivité donnée, d'une année sur l'autre¹³⁵.1

Ou/et

2/ La **valeur ajoutée intrinsèque au produit**. Exemple : le coût de production d'une bière Molson s'élève à environ 20 cents, mais on peut la vendre à 2\$ en cannette dans un dépanneur, 5\$ en pinte dans un bar et même 11\$ au Centre Bell. Si 10 bières sont vendues au prix de 15 cents, la valeur créée est beaucoup moins forte qu'une bière au prix de 11\$. Ces différences

¹³³ La « valeur ajoutée » est une variable monétaire. Car s'il s'agit seulement d'une augmentation des prix, c'est de l'inflation. Si c'est une augmentation de la valeur intrinsèque du produit, c'est vraiment la valeur ajoutée. Voir paragraphe 1.3.2.1.3

¹³⁴ Croissance, n.f., *Dictionnaire de l'économie*, Encyclopédia Universalis, sous la dir. de Jézabel Couppey-Soubeyran, Albin Michel, 2007, (p.289), Paris.

¹³⁵ *Ibid.*, p. 289.

de prix correspondent en quelque sorte à des produits différents, ne contenant pas la même valeur, parce que ne reposant pas sur la même quantité de travail, par exemple.

D'une année à l'autre, on pourra donc constater une croissance économique avec autant, voire moins de bières produites, tant que la valeur ajoutée totale des bières Molson produites est supérieure à celle de l'an passé.

1.3.2.1.2 Pourquoi a-t-on besoin de croître?

Selon la pensée économique dominante, la croissance économique serait synonyme « d'abondance de biens, d'opulence, de fortune et de prospérité¹³⁶» (Albertini, J., & A. Silem, A., 2010) ainsi que de stabilité pour les entreprises et les gouvernements.

Bien qu'elle soit un terme plus restreint que le processus de développement¹³⁷, « notion qualitative qui intègre généralement, au-delà du revenu par tête, l'espérance de vie et le niveau d'éducation »¹³⁸, elle apparaîtrait comme une condition nécessaire au bonheur. « Cette abondance s'accompagne de revenus plus élevés qui entraînent plus de choix, des vies plus confortables, une qualité de vie améliorée pour ceux qui en profitent¹³⁹. Elle contribuerait donc à cette idée de développement, synonyme de « progrès social », qui « entraîne avec elle l'idée réconfortante que les choses s'améliorent globalement » comme « une société meilleure pour nos enfants », « un monde plus juste », « un lieu où les plus défavorisés s'épanouiront un

¹³⁶ Elle se traduit par un niveau de vie tel que les individus peuvent profiter un maximum de leur vie. Dans une économie capitaliste, la prospérité, et donc l'atteinte de ce niveau de vie, sont rendues possibles grâce à la production de biens et services.

¹³⁷ Amartya Sen, prix Nobel de l'économie donne une définition du développement qui englobe à la fois les besoins spirituels et matériels des êtres humains (Romerio, F. (2007). *Les controverses de l'énergie* (1st éd.). Le Savoir suisse).

¹³⁸ Jézabel Couppey-Soubeyran (éd.), *op. cit.*, p. 289.

¹³⁹ *Ibid.*, p. 289.

jour » (Jackson, 2010 :20)¹⁴⁰. Pour rendre compte de ce bien-être, d'autres indicateurs composites de « bien-être », bien au-delà du simple indicateur du PIB (voir paragraphe plus bas), existent aujourd'hui, tel que l'Indice du développement humain (IDH).

1.3.2.1.3 *Comment mesure-t-on la croissance économique?*

Le PIB est une méthode statistique pour estimer la valeur au marché de tous les biens et services transformés dans une économie au cours d'une période donnée. Il « consiste en l'addition de l'ensemble des biens et services produits contre rémunération »¹⁴¹. Il est exprimé en \$.

Le PIB a certaines caractéristiques. Par exemple, « le travail accompli comptabilisé dans le PIB est uniquement celui qui l'est en échange d'argent »¹⁴². De ce fait, le PIB ne prend pas en compte les tâches ménagères d'une femme au foyer. D'autre part, afin de ne pas faire de double comptage, on mesure la valeur ajoutée totale du travail accompli¹⁴³. Par exemple, le prix du pain acheté en magasin tient compte du coût de ses intrants et de la valeur ajoutée à chaque étape du processus de production. Donc, on ne va pas additionner la valeur du pain et la valeur de la farine produite pour faire le pain, puisque cette dernière est déjà dans la valeur du pain. Enfin, pour qu'il y ait croissance économique, il doit y avoir croissance du PIB.

Le PIB se mesure par l'addition de toutes les dépenses finales consenties pour acquérir des biens et des services dans l'économie. Celles-ci incluent les dépenses à la consommation (C),

¹⁴⁰ Jackson, T. (2010). *Prosperité sans croissance* (p. 20). Bruxelles: De Boeck.

¹⁴¹ Jézabel Couppey-Soubeyran (éd.), *op. cit.*, p. 289.

¹⁴² *Ibid.*, p. 34.

¹⁴³ *Ibid.*, p. 34.

les dépenses publiques (G), l'investissement brut dans le capital immobilisé (I) et les exportations nettes (X-M) (Rajca, 2015)¹⁴⁴:

$$PIB [\$] = C + G + I + (X - M)$$

Avec :

C : Dépenses de consommation; G : Dépenses gouvernementales; I : Investissements privés et publics; X : Exportations; M : Importations.

Pour chacun des facteurs présentés dans l'équation ci-dessus, on peut les calculer de deux façons. Soit en utilisant le PIB réel, soit en utilisant le PIB nominal.

Le PIB nominal est la valeur de la production au courant d'une période de l'année en fonction des prix du marché ayant cours pendant cette période.

$PIB \text{ nominal} = \text{prix de l'année} \times \text{quantités de l'année}$

L'augmentation du PIB nominal peut venir autant d'une augmentation des prix que de la production. Or, l'augmentation du prix peut provenir soit de l'inflation (exprimée en %, voir définition paragraphe suivant), soit de la valeur ajoutée intrinsèque au produit. Ainsi, **pour mesurer la croissance économique réelle, en tenant compte de la création de valeur, on soustrait l'inflation [%] du taux de croissance du PIB nominal [%].**

Le PIB réel est la valeur de la production au prix d'une année de référence, évitant ainsi de comptabiliser l'inflation – c'est-à-dire l'augmentation généralisée des prix – dans le calcul de

¹⁴⁴ Rajca, P. (2015). *Les méthodes de calcul pour le Produit Intérieur Brut (PIB)*. EducationFinance.ca. Consulté le 3 août 2017, à l'adresse <https://www.educationfinance.ca/economie/les-methodes-de-calcul-pour-le-produit-interieur-brut-pib/>

la croissance économique. On obtient donc une mesure qui tient compte à la fois des volumes et de la valeur ajoutée.

$$\text{PIB réel} = \text{prix d'une année de référence}^{145} \times \text{quantités de l'année}$$

La croissance économique est toujours mesurée avec le PIB réel. **Pour avoir de la croissance économique réelle, il faut donc une augmentation du produit : « Volume x Valeur ajoutée »**, tel que présenté au paragraphe 1.3.2.1.1.

1.3.2.1.4 *La création de valeur est différente de l'inflation*

La création de valeur d'un produit ne doit pas être confondue avec l'inflation. L'inflation est une augmentation généralisée des prix, qui n'est pas nécessairement liée à une modification des produits. Le PIB peut augmenter d'une année à l'autre sans qu'il n'y ait de réelle croissance. Cet accroissement est alors simplement le reflet d'une hausse générale des prix et des salaires : l'inflation. Pour se donner un ordre de grandeur, l'inflation au Canada « était de 1,4% entre août 2016 et août 2017 (Statistique Canada, 2017)¹⁴⁶. Ainsi, le prix d'un téléphone peut augmenter alors qu'il n'y a eu aucun changement sur les caractéristiques de ce téléphone tout simplement parce qu'il y a une inflation affectant tous les prix des téléphones et de l'électronique. La création de valeur est liée, quant à elle, soit à une action matérielle (un changement des caractéristiques physiques du produit qui lui donne plus de valeur) soit immatérielle (par exemple des actions de marketing qui font en sorte que le produit a plus de valeur aux yeux du consommateur). Cela donne lieu à une augmentation de prix, mais spécifiquement pour ce produit. Et cette augmentation du prix est basée sur une action précise touchant la valeur que donne le consommateur à ce produit.

¹⁴⁵ Le prix de l'année en question est exprimé en dollars de l'année de référence, c'est-à-dire ajusté pour tenir compte de l'inflation entre l'année de référence et l'année en question.

¹⁴⁶ Statistique Canada. (2017). *Indice des prix à la consommation, par province (mensuel) (Canada)*. Statcan.gc.ca. Consulté le 5 octobre 2017, à l'adresse <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/cpis01a-fra.htm>

1.3.2.2 Qu'est-ce que le découplage?

« La réponse conventionnelle au dilemme de la croissance consiste à invoquer le concept du « découplage ». Les processus de production se reconfigurent. Les biens et les services sont repensés. La production économique s'affranchit progressivement de sa dépendance aux flux de matières. De la sorte, espère-t-on, l'économie peut continuer à croître sans enfreindre les limites écologiques, ou tomber à court de ressources » (Tim Jackson, 2010).

Pour réussir à maintenir la croissance économique sans détruire à plus ou moins long terme les conditions de vie humaine sur Terre, il faut réussir à accomplir ce que les partisans du développement durable appellent un découplage, c'est-à-dire dissocier la croissance et son impact écologique. Cela suppose de conserver un taux de croissance positif tout en diminuant la dégradation écologique causée par ces efforts de croissance.

Tim Jackson introduit les notions de découplage relatif et de découplage absolu. Le découplage est relatif si la dégradation environnementale est moins rapide que la croissance économique : comme la droite bleue du graphique ci-dessous, on diminue l'augmentation (comprise entre 0 et 1) des déchets par rapport à celle de la croissance économique. Mais on continue de les faire croître (droite bleue croissante), c'est-à-dire qu'en valeur absolue, la quantité de déchets augmente année après année.

Le découplage est absolu si la quantité de déchets diminue quand la croissance augmente. L'effet ciseau entre la droite noire et la courbe verte montre qu'on fait plus que ralentir la production de déchets, on la diminue en valeur absolue par rapport aux années précédentes.

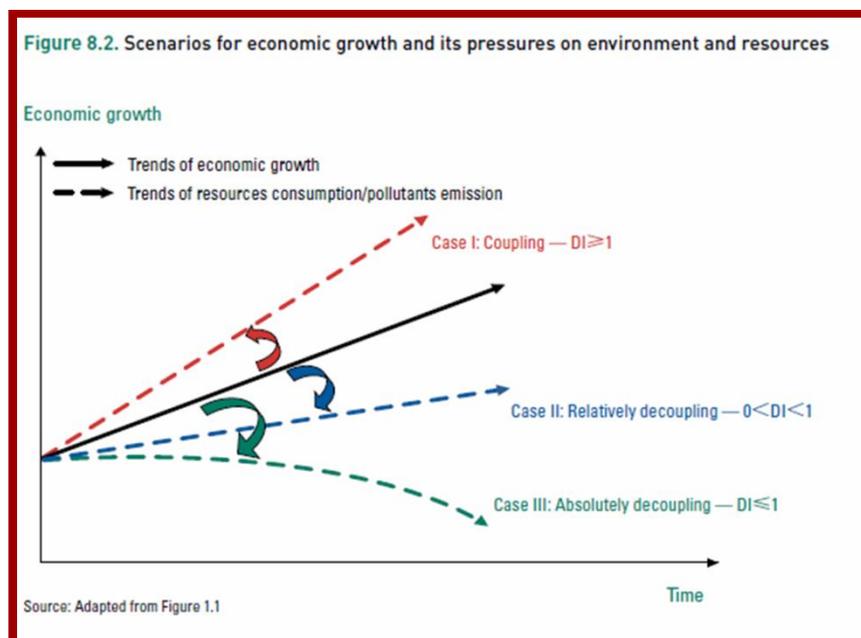


Figure 21. Schéma explicatif de découplage absolu et relatif

Source : United Nations Environment Programme, 2011¹⁴⁷

Il faudrait donc, en vue d'obtenir une croissance économique durable, un découplage entre le flux énergétique requis et la valeur créée. C'est-à-dire que **le volume en quantité de matériel requis doit cesser d'augmenter, ou même diminuer** au fur et à mesure des années.

Le découplage, analysé par l'IEA, s'observe depuis 2013 (Figure 22). La quantité de déchets n'augmente pas, mais elle ne diminue pas non plus. C'est un découplage relatif.

¹⁴⁷ United Nations Environment Program [PNUE]. (2011). *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth* (p. 111). International Resource Panel. Consulté à l'adresse http://www.gci.org.uk/Documents/Decoupling_Report_English.pdf

Figure 22. Découplage relatif entre les émissions de CO₂ et la croissance économique à l'échelle mondiale

Source: AIE, *Decoupling of global emissions and economic growth confirmed*, 2016¹⁴⁸

Pour obtenir ce découplage, il faut donc réduire les impacts écologiques de nos activités. Or, nous avons vu que la principale cause du réchauffement climatique est la combustion des énergies fossiles dans le secteur énergétique. Il faudrait ainsi réduire leur combustion, donc leur usage. « Le PNUE a traduit l'évaluation du GIEC en disant qu'il fallait parvenir à la neutralité carbone" (zéro émission nette de CO₂) entre 2055 et 2070, et à zéro émission de gaz à effet de serre entre 2080 et 2100¹⁴⁹ ». Pour y arriver, il faut impérativement entamer une sortie progressive de l'usage des fossiles.

¹⁴⁸ AIE. (2016). *Decoupling of global emissions and economic growth confirmed*. Iea.org. Consulté le 3 août 2017, à l'adresse <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/march/decoupling-of-global-emissions-and-economic-growth-confirmed.html>

¹⁴⁹ « Cela revient également, toujours selon les données scientifiques, à laisser dans le sous-sol terrestre les 4/5 environ des réserves actuelles d'énergies fossiles » Rondreux, V. (2014). *Contenir le réchauffement à +2°C*,

Comment procéder?

Si l'on souhaite poursuivre la croissance économique, comment, dans un contexte de transition énergétique, peut-on faire croître la valeur ajoutée de la production et/ou du volume de la production sans mobiliser toujours plus d'énergie fossile?

Selon la pensée économique orthodoxe, il serait possible, sur le plan théorique, de faire croître la valeur ajoutée et le volume de la production sans mobiliser plus d'intrants énergétiques grâce à deux solutions que nous analyserons plus en profondeur ci-après :

1/ Pour faire croître le volume de production sans mobiliser plus d'intrants énergétiques, on mobilise les **gains en productivité** (paragraphe 1.3.2.3).

2/ Pour faire croître la valeur intrinsèque d'un produit ou d'un service spécifique, on mobilise la **dématérialisation** (paragraphe 1.3.2.4).

1.3.2.3 Les gains de productivité dans les équations de Cobb Douglas et de Romer

Nous avons vu qu'il est possible de faire croître notre économie par la croissance de la production. En économie, la croissance de la production s'obtient par la croissance « de facteurs de productions »¹⁵⁰ qui sont les capacités productives d'un humain (qu'on appelle aussi capital humain) et les outils de production (appelé stock en capital ou encore capital physique qui sont les biens d'équipement et les structures).

c'est programmer une sortie des énergies fossiles. Dr Pétrole & Mr Carbone. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <http://dr-petrole-mr-carbone.com/contenir-le-rechauffement-a-2c-cest-programmer-une-sortie-des-energies-fossiles/>

¹⁵⁰ Croissance, n.f., *Dictionnaire de l'économie*, Encyclopédia Universalis, sous la dir. de Jézabel Couppey-Soubeyran, Albin Michel, 2007, (p.290), Paris.

Cette combinaison technique et humaine de facteurs est représentée dans la fonction de production¹⁵¹ de Cobb Douglas¹⁵² :

$$Q = cK^a \times T^b$$

Où :

Q = correspond à la production [\$];

K = stock en capital (c'est le capital physique composé de capital matériel – ordinateur – et capital immatériel – logiciel) [\$] ;

T = force de travail / capacité productive d'un humain – volume de travail et qualité de la main-d'œuvre / capital humain;

c, a et b sont des constantes¹⁵³ déterminées par la technologie (progrès technique, innovation). a = élasticité de Q par rapport à K; b = élasticité de Q par rapport à T. Cette élasticité se réfère à l'élasticité de substitution entre les deux facteurs qui permettent de produire la même quantité de produit (Albertini & Silem, 2010 : 347)¹⁵⁴.

Faire croître la production, c'est faire croître les facteurs de production de l'équation T et K c'est-à-dire le capital humain (nombre d'heures de travail, productivité) et le capital physique (biens, équipement tels que les logiciels). Si nous prenons l'exemple de l'esthéticienne, le stock en capital serait ses biens d'équipement (locaux, machines). Le flux de matière et

¹⁵¹ Une fonction de production établit, sous sa forme la plus générale, une relation entre la quantité de produits obtenus (les extrants ou outputs) et les quantités des différents services producteurs utilisés (les intrants ou inputs)

¹⁵² Dans l'équation, tous les types d'intrants peuvent être ajoutés, mais dans les modèles économiques, on ne met que les principaux intrants (travail et capital) pour simplifier les manipulations mathématiques.

¹⁵³ Ce sont des constantes à très court terme, mais à long terme, tout varie. La composante c, c'est le progrès technique qui augmente dans le temps. a et b peuvent aussi changer dans le temps, en fonction des nouvelles technologies.

¹⁵⁴ Voir chapitre 2.

d'énergie part de sources environnementales (pétrole, plantes, produits chimiques). Ce flux est transformé par des systèmes énergétiques (raffineries, usines chimiques) qui ne sont pas pris en compte. Le travail serait celui de l'esthéticienne (et de ses éventuels employés) – et non tout le capital humain, du conducteur de la foreuse pour aller puiser le pétrole à l'esthéticienne.

Mais, d'après cette équation, **le gain de productivité est tout aussi important que les facteurs de production T et K.** la productivité est définie comme « la quantité de biens et services produite en une heure par un travailleur » (Mankiw & Taylor, 2011 : 681). Le gain de productivité est défini comme la capacité de produire plus avec la même quantité de ressources ou, alternativement, produire tout autant avec moins de ressources. Ce gain est représenté par la constante c , constante à court terme mais qui varie dans le temps et qui dépend de plusieurs paramètres.

Romer, en 1990, donne une version étendue de l'équation de Cobb Douglas où les différents gains de productivité (p , I^μ , a , b , c et d) sont présentés.

$$y = p(H^\nu I^\mu)K^a T^b H^c E^d$$

Où :

y = production

p = facteur de productivité

H = capital humain hormis le travail

I = stock de connaissances

K = capital physique

T = travail

E = énergie

a , b , c et d sont encore là des constantes déterminées par la technologie (progrès technique, innovation). En ce qui concerne la transition, a et d diminuent car la transition a pour but de réduire la part des *throughput*.

Par ailleurs, même si K , T et E ne bougent pas, il y a un facteur de productivité p qui peut faire en sorte que l'on puisse produire plus avec la même quantité de ressources. Dans cette équation, il dépend de la quantité de capital humain et du stock de connaissance.

Si nous reprenons l'exemple de l'esthéticienne, afin que son commerce puisse croître, il faudra soit qu'elle travaille plus, s'il y a plus de demande, employer plus de personnel qui à son tour devra travailler plus. Mais comme le temps est limité, on privilégiera le terme travailler « mieux », c'est-à-dire produire plus de valeurs marchandes en un temps de plus en plus court. C'est donc la notion de **productivité** qui est fondamentale dans la recherche de la croissance économique. Sa productivité pourrait être améliorée par la mise en œuvre de processus plus efficaces tels que l'optimisation du temps de travail, l'utilisation de technologies facilitatrices (un ordinateur, un logiciel, accès à l'information plus rapide grâce à internet, une machine de transaction, un robot massant etc.), l'ajout d'équipements plus performants, la formation de la main-d'œuvre, etc.¹⁵⁵

On peut penser que les gains de productivité varient dans le sens positif et qu'ils sont illimités, si l'on pense que les progrès techniques ne cessent d'augmenter¹⁵⁶ ou que les connaissances sont infinies. On pourrait donc croire que ce gain de productivité nous permettrait de produire toujours autant de produits et services avec moins de matériel physique (moins de K , moins de E , moins de T) ce qui amène à un certain découplage entre le matériel physique requis pour obtenir le même produit, et à une possible croissance infinie.

Par ailleurs, les gains de productivité permettent de compenser la dépréciation du stock en capital. Comme nous l'avons vu, le capital productif est soit du capital matériel (machine) ou immatériel (connaissance). Pour obtenir la croissance, le capital productif, aussi appelé

¹⁵⁵ Croissance, n.f., *Dictionnaire de l'économie*, Encyclopédia Universalis, sous la dir. de Jézabel Couppey-Soubeyran, Albin Michel, 2007, Paris.

¹⁵⁶ *Ibid.*, p. 293.

investissement net¹⁵⁷, doit augmenter au cours du temps. Or le capital matériel se déprécie au cours du temps. La dépréciation signifie simplement que le capital doit être remplacé au minimum. Pour maintenir le PIB croissant, « on doit réaliser au moins assez d'investissement pour remplacer le capital qui se déprécie chaque année » (Harris & Roach, 2017 : 211-213), sauf si on gagne en productivité, ce qui signifiera que le prochain produit qu'on achètera coûtera moins cher car il coûtera moins cher en énergie. Selon l'équation de Romer, le gain de productivité peut compenser pour la dépréciation. Par exemple, si une entreprise dispose de deux machines qui vieillissent (dépréciation), elle peut les remplacer, mais par une seule machine, plus efficace (gain de productivité).

Les gains de productivité seraient donc un facteur déterminant pour la croissance économique, et ils l'auraient été durant les deux derniers siècles de croissance (Gordon, 2003)¹⁵⁸. En 1870, aux États-Unis, plus de 4 kg de flux de matières et d'énergie¹⁵⁹ étaient utilisés pour créer une unité de PIB. Au début du 20^{ème} siècle, grâce aux gains de productivité acquis notamment par le progrès technique, on n'utilisait plus qu'1 kg de matières et d'énergie pour produire la

¹⁵⁷ L'investissement net, qui est égal à l'investissement brut moins la dépréciation, est un facteur dans la mesure du PIB. Il fait en quelque sorte état de la richesse nationale car si celui-ci est négatif, cela veut dire « qu'il n'y a pas suffisamment d'investissement de remplacement » (Harris & Roach, 2017 : 211-213), ce qui entraîne « un déclin de la richesse nationale » (Harris & Roach, 2017 : 211-213). Cependant, le cas est différent pour le capital naturel car il « n'existe pas de provision semblable pour ce qui est de sa dépréciation » (Harris & Roach, 2017 : 211-213). C'est pour cela que les économistes essaient de développer des mesures plus complexes que le PIB pour mesurer le « bien-être ».

¹⁵⁸ Gordon, R. (2003). *Deux siècles de croissance économique : l'Europe à la poursuite des États-Unis*. Ofce 84. Consulté à l'adresse <https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/revue/1-84.pdf>

¹⁵⁹ Pour comptabiliser la quantité de flux de matières et d'énergie, Gierlinger & Krausmann (2011) ont suivi la classification des matériaux utilisée par Eurostat (2009) et distinguent entre 50 et 60 groupes de matériaux pour l'extraction domestique, les importations et les exportations aux États-Unis. Dans cette étude, les données et les indicateurs sont présentés pour quatre principaux groupes de matériaux : la biomasse, les énergies fossiles, les minerais, et les minéraux non métalliques (2011 : 366).

même richesse (Gierlinger & Krausmann, 2011 : 372)¹⁶⁰, soit une diminution d'un facteur quatre dans la consommation de matières et d'énergie. Par exemple, 4 kg d'aluminium étaient autrefois nécessaire pour créer un produit A. Aujourd'hui, pour créer ce même produit, nous en avons besoin de seulement 1 kg, de 4 fois moins d'aluminium. Il pourrait donc y avoir en théorie une forme de croissance avec une diminution de la quantité d'énergie-matière mobilisée grâce aux gains de productivité.

Nous venons donc de voir qu'il était possible, selon la pensée économique orthodoxe, de créer autant de produits et services avec moins d'intrants énergétiques grâce à la productivité. Analysons maintenant ce qu'est la création de valeur par la dématérialisation.

1.3.2.4 La création de valeur par la dématérialisation de l'économie

La dématérialisation de l'économie (Herman, Ardenaki, & Ausubel, 1990 : 333)¹⁶¹ consiste à créer d'avantage de richesses monétaire avec la même quantité de « *throughput* » mobilisée pour sa fabrication, grâce à des actions immatérielles (FNH, s.d. : 3)¹⁶².

Prenons l'exemple de l'iPhone. Celui-ci coûte environ 75\$ à produire, mais il est vendu à un prix d'environ 800\$. Pourquoi ? La différence de ce prix est dû à la valeur ajoutée créée par l'innovation, le design, le marketing, l'ergonomie, etc., que l'on présente comme des intrants peu énergivores, qu'on qualifie aussi d'« immatériels ».

¹⁶⁰ Gierlinger, S., & Krausmann, F. (2011). The Physical Economy of the United States of America. *Journal Of Industrial Ecology*, 16(3), 365-377. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00404.x.

¹⁶¹ Herman, R., Ardenaki, S., & Ausubel, J. (1990). *Dematerialization* (pp. 333-347). *Phe.rockefeller.edu*. Consulté 4 August 2017, à l'adresse <https://phe.rockefeller.edu/docs/Demat.Tech.Forecasting.pdf>

¹⁶² Fondation pour la Nature et l'Homme [FNH]. (s.d.). *Dematerialisation de l'économie et conservation des ressources naturelles* (p. 3, 4 pages). Sommet mondial sur le développement durable 2002, Ministère des Affaires Étrangères, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Consulté à l'adresse http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_economie_conserv.pdf

Même une entreprise qui conçoit des logiciels (bien immatériel) consomme de l'énergie. Il faut de l'énergie et des biens matériels pour faire fonctionner les ordinateurs et les serveurs (très énergivores), pour faire un déplacement en voiture pour un rendez-vous et aller au travail, etc. Mais cette activité serait moins énergivore que la fabrication physique. La composante énergétique et matérielle deviendrait donc de moins en moins importante au fur et à mesure que l'économie devient tertiaire ou repose sur des intrants immatériels.

Donc, il y a une forme de déconnexion entre la production et la valeur. Pour ainsi dire, fabriquer des iPhone consomme de l'énergie et des matériaux. Mais le total de la valeur est représenté à plus de 90% par de l'immatériel et du service (design, marketing, ingénierie, etc.) qui est beaucoup moins énergivore.

Avec la tertiarisation de l'économie, qui est une économie de service, la composante immatérielle serait de plus en plus importante dans l'équation de la croissance économique (Gierlinger & Krausmann, 2011 : 372). En d'autres termes, dans cette économie moderne, la valeur prend de plus en plus de place par rapport au volume.

Autre avantage que présente la dématérialisation de l'économie, au regard de la théorie néoclassique, est que le capital immatériel (connaissances, savoir, etc.) ne semblerait pas se déprécier.

1.3.2.5 Quelle serait l'équation de la croissance économique dans un contexte de transition énergétique ?

Si l'on intègre les paramètres de la transition énergétique, on pourrait alors imaginer une nouvelle équation intégrant :

- ER = Energies renouvelables,
- R = ressources naturelles non renouvelables,

- et RR = ressources renouvelables (exemple les arbres, les légumes) ou recyclées (plastiques recyclés par exemple).

On a E = énergies fossiles

Ce qui donnerait :

$$y = p(H^\nu I^\mu)K^a L^b H^c E^d ER^\epsilon R^f RR^g$$

On peut avoir de la croissance durable si la réduction drastique de E (fin de l'utilisation des énergies fossiles) et de R (ressources naturelles non renouvelables) est plus que compensée par :

- 1) l'augmentation d'ER
- 2) l'augmentation de ϵ , c'est-à-dire l'efficacité des énergies renouvelables
- 3) l'augmentation de RR
- 4) l'augmentation de g , c'est-à-dire l'efficacité des ressources renouvelables
- 5) l'augmentation de p , c'est-à-dire des gains de productivité

La tertiarisation de l'économie, c'est quand K, R et RR sont de moins en moins nécessaires pour produire, au profit de c et de H . Cette équation a un problème cependant : elle ne tient pas compte de la valeur, mais uniquement du volume de production. Pour être complet, il faudrait la prendre en compte car comme nous l'avons vu, la valeur est de plus en plus découplée des ressources matérielles, car cette valeur vient de plus en plus de ressources immatérielles (design, ergonomie, marketing, image de marque, facilité d'utilisation, mode, valeur expérientielle, etc.). Exemple : à un salon de coiffure, un massage d'une heure vaut 75\$, ce qui signifierait qu'un massage de 5 mn vaudrait 6,25\$. Or, ma coiffeuse me charge 15\$ pour celui-ci. Ce salon a donné de la valeur à son salon.

1.3.2.6 Conclusion

Sur le plan théorique, nous avons vu que la croissance économique résulte du facteur démographique (capital humain), du flux de matière et d'énergie et des gains de productivité.

1/ Les flux de matières et d'énergie du système économique, les *throughput*, mobilisés en tant que facteurs de production pour produire des biens et services permettent la croissance économique. Or, ces flux de matières et d'énergie créent des GES et ne sont disponibles qu'en quantités limitées sur Terre. Ainsi, **si les gains de productivité sont inférieurs à la vitesse de dégradation des ressources**, il risque d'y avoir décroissance économique. En effet, si la quantité de *throughput* diminue, leur prix augmentera et entraînera sans doute un frein à l'économie. Personne ne pourra plus s'acheter de produits issus du pétrole par exemple. Avec des gains de productivité trop faibles, notre économie ne sera donc pas assez productive pour compenser ce frein, ce qui infligera un effet négatif sur la croissance.

Comment alors accomplir la transition énergétique sans décroissance économique ?

2/ Selon la théorie économique standard, avec les gains de productivité, l'efficacité croissante des énergies renouvelables, le recyclage croissant des matières, il n'est peut-être pas nécessaire d'avoir de la décroissance pour sauver la terre et l'humanité. Pourquoi? Car **si les gains de productivité sont supérieurs à la vitesse de dégradation des ressources**, ils permettront de créer autant de biens et services avec moins de ressources en amont. Peut-être faudra-t-il avoir une croissance beaucoup plus faible, mais une croissance tout de même. Le niveau de croissance dans un contexte de développement durable n'est pas vraiment calculé. De ce point de vue, accomplir une transition énergétique (utilisation des énergies renouvelables et recherche des gains de productivité) **rapide** pour garder le même niveau de vie serait nécessaire. Peut-on accomplir cette transition énergétique sans décroissance économique? Toujours selon la théorie économique standard, c'est justement la croissance économique qui permettra de l'accomplir, dans le sens où elle nous donnera les moyens pour arriver à des gains de productivité (grâce à la recherche et développement, aux progrès techniques, et aux investissements nécessaires pour remplacer les systèmes existants etc.) qui permettront de compenser la dégradation des ressources. La théorie économique standard

affirment donc que ces gains permettront d'acquiescer le découplage recherché. Avec les nouvelles technologies, il sera possible d'avoir une croissance faible, mais durable. Et inversement.

3/ La dématérialisation de l'économie permet quant à elle de créer une déconnexion entre la création de valeur ajoutée et les *throughput* qui a le potentiel de s'accroître. Romer montre que le capital immatériel peut augmenter de façon exponentielle, ce qui permet d'augmenter la valeur du produit/service sans ajouter d'intrants matière-énergie supplémentaire.

Il y a donc trois moyens de maintenir la croissance économique : soit par la production matérielle, soit par les gains de productivité, soit par la création de valeur. Voyons maintenant comment nous pouvons mettre en pratique l'équation de transition énergétique proposée au paragraphe 1.3.2.5.

1.3.3 Substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables

On doit « **recourir à des énergies et à des technologies plus propres**, ce qui permettra de réduire simultanément les émissions de dioxyde de carbone et celles d'autres substances polluantes qui sont d'effets dommageables » (IPCC, 1992 :130). L'avantage des énergies renouvelables, c'est qu'elles ne sont pas polluantes et sont inépuisables. Elles permettraient donc un découplage relatif, c'est-à-dire une stagnation de la quantité de déchets produits par rapport à la croissance du PIB.

Ces énergies, au moyen de technologies, permettent de fournir de l'électricité (centrales éoliennes, panneaux solaires, centrales hydroélectriques, biomasse par la production de vapeur) ou de la chaleur (CSP, centrales géothermiques, biomasse) et répondre à nos besoins : se chauffer, se nourrir, se déplacer, communiquer.

1.3.3.1 L'éolien et le solaire pour substituer les énergies fossiles par des énergies renouvelables dans la production d'électricité

La situation actuelle de production d'électricité dans le monde est la suivante : en 2013, la production totale est égale à de 23 405,7 TWh. Plus des trois quarts sont octroyées à la production d'électricité à partir de la combustion (portant le nom de thermique à flamme dans la figure ci-dessous). Les énergies renouvelables représentent une faible partie de la production d'électricité, avec une part égale un peu inférieure à 23% (Electricité de France [EDF], 2017)¹⁶³.

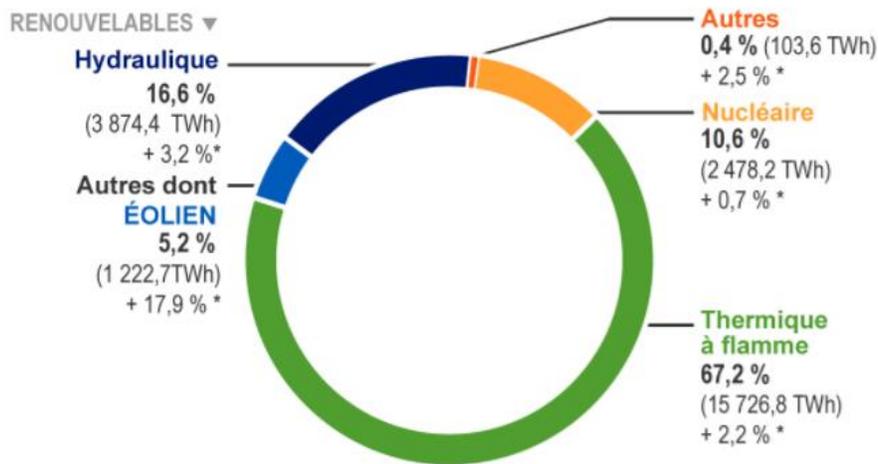


Figure 23. Part de l'éolien dans la production mondiale de l'électricité en 2013

Source : EDF, 2017¹⁶⁴

L'éolien occupe la 2e place; elle est avec le solaire l'énergie qui a le plus progressé ces 10 dernières années. (EDF, 2017). Ainsi, même si l'électricité ne représente pas l'énergie la plus

¹⁶³ *L'éolien en chiffres*. (2017). EDF France. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-eolien-en-chiffres>

¹⁶⁴ *L'éolien en chiffres*. (2017). EDF France. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-eolien-en-chiffres>

consommée dans le monde (Negawatt, 2014), les énergies renouvelables produisant de l'électricité telles que l'énergie éolienne et solaire « focalisent l'attention » (Negawatt dir., 2013 : 13). Compte tenu de leur potentiel d'évolution, certains affirment que les énergies renouvelables éoliennes et solaires seraient le meilleur moyen pour remplacer la production d'énergie électrique à partir de fossile. En termes de capacité, « une seule éolienne de 2 MW fournit de l'électricité pour 2 000 personnes, chauffage compris» (EDF, 2017).

1.3.3.2 Biomasse, géothermie et capteurs solaires pour substituer les énergies fossiles par des énergies renouvelables pour produire de la chaleur

L'énergie fossile pour le chauffage serait remplacée par l'énergie provenant des capteurs solaires, des centrales géothermiques et de la biomasse.

Pour certains, l'essentiel se joue sur la mise en place d'un système moderne de biomasse (Negawatt dir., 2013 : 13). La biomasse est une source d'énergie aux caractéristiques fort intéressantes car elle fournit trois vecteurs énergétiques : l'électricité, la chaleur et le carburant (Morris, G., & D. Pehnt, 2015 : 58). Elle constitue donc un bon potentiel de développement. Cependant, d'après la figure ci-dessous, elle est émettrice de particules fines¹⁶⁵ et est en partie responsable des émissions anthropogéniques polluantes et néfastes pour la santé humaine. De plus, compte tenu de sa densité plus faible que celle des EF (voir paragraphe 1.1.4.3), on doit utiliser une grande superficie de terrain pour répondre aux mêmes besoins. C'est pour cela qu'on doit absolument analyser le cycle de vie de cette filière afin de savoir si elle est gérée de manière responsable, c'est-à-dire si elle se « reconstitue plus rapidement qu'elle n'est utilisée » (Godard et al., 2012 : 9) afin qu'elle soit disponible sur le long terme.

¹⁶⁵ Dans le cas de la combustion de la biomasse, on crée des particules carbonées de diamètre très petit, appelée fumées noires (*Pollution de l'air : les particules fines (PM2,5, PM10)*. (2017). *Notre-planete.info*. Consulté 3 août 2017, à l'adresse https://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/particules-fines.php)

Par ailleurs, le gaz sera le dernier combustible fossile utilisé et puis remplacé par l'hydrogène généré par l'énergie renouvelable d'ici 2050 (Teske, S., Sawyer, S., & Schäfer, 2015). L'hydrogène est utilisé dans des piles à combustibles, genre de batterie dans laquelle une réaction entre l'hydrogène et l'oxygène produit de la chaleur et de l'électricité.

1.3.3.2.1 Le biocarburant et l'hydrogène pour substituer les énergies fossiles par des énergies renouvelables pour se déplacer

Nous évoquons ici le secteur du transport car c'est le secteur le plus délicat à substituer, particulièrement pour les avions, les navires de commerce et la machinerie lourde (grue, camion, excavatrice) qui demandent une énergie très dense, en grande quantité, et stockable. On aurait donc recours à des carburants synthétiques et à de l'hydrogène pour remplacer l'essence (Teske, S., Sawyer, S., & Schäfer, 2015). Parmi les carburants de synthèse, on trouve le procédé « gas to liquid » ou GTL, « coal to liquid » ou CTL et « biomasse to liquid » ou BTL. Le GTL et le BTL seraient moins polluant que le pétrole car la matière première, est telle qu'on l'a vu, moins émettrice de CO_{2eq}. Les bio-carburants peuvent se substituer aux énergies fossiles. « Il s'agit de produire du carburant à base de production agricole (plantes, huile végétale). Au Brésil par exemple, l'éthanol, alcool extrait de la canne à sucre, est utilisé pour remplacer le carburant fossile (Hamour, N. 2008)¹⁶⁶. Quant au CTL, procédé utilisé pour la première fois à grande échelle durant la seconde guerre mondiale en Allemagne (Quiret, M., 2017)¹⁶⁷, pourrait être une solution si celui-ci est couplé à la technique de capture et de stockage du charbon, ou CCS¹⁶⁸. Ce procédé est habituellement très coûteux car comme on l'a mentionné plus haut, le processus de séparation du CO₂ des autres molécules chimique

¹⁶⁶ Hamour, N. (2008). *Énergies, les défis d'hier et d'aujourd'hui*. Ellipses.

¹⁶⁷ Afin d'être indépendant en essence, la production de charbon liquide a été « engagé » pendant la Seconde Guerre mondiale par l'industrie chimique allemande (Quiret, M. (2017). *Du charbon liquide pour l'après-pétrole*. lesechos.fr. Consulté 4 août 2017, à l'adresse https://www.lesechos.fr/03/04/2008/LesEchos/20144-058-ECH_du-charbon-liquide-pour-l-apres-petrole.htm

¹⁶⁸ Capture et stockage du carbone

(l'azote) est très complexe. Or dans un procédé de fabrication de carburant synthétique, le CO₂ est déjà séparé. Par ailleurs, la substitution des voitures à essence par des voitures électriques équipées de batterie serait une bonne option.

1.3.3.3 Technologie de substitution

Un exemple de ce qui peut se développer pour remplacer les énergies fossiles pour la production de chaleur et de force motrice dans les transports est présenté dans la figure ci-dessous. Pour la production de chaleur, on utilise l'air ambiant et l'énergie des ER par un système de pompe à chaleur. Pour la force motrice, on y développerait des moteurs électriques alimentés par des batteries électriques chargées au moyen des ER et des carburants alternatifs¹⁶⁹, comme le biogaz.

¹⁶⁹ « La table ronde Erdgasmobilität (le gaz naturel au service de la mobilité), la task-force sur le GNL et les poids lourds, l'initiative « Mobilité H2 », la mise en œuvre de la directive européenne sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs » http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10, page 6.

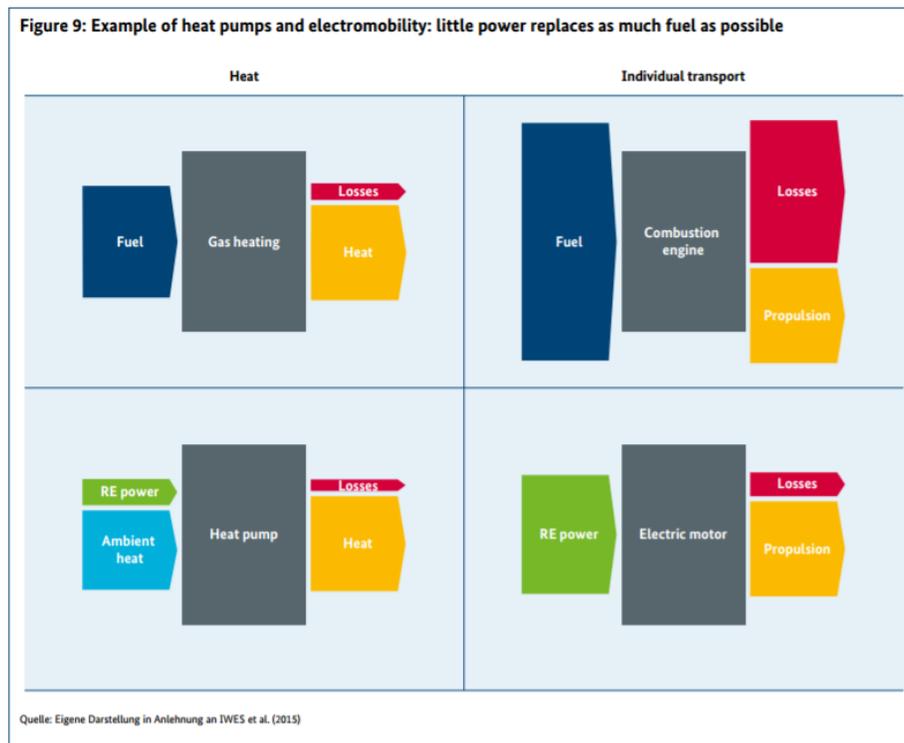


Figure 24. Exemple de substitution pour la chaleur et le transport

Source : BMWI, 2016 : 28¹⁷⁰

Ainsi, la première dimension de la transition énergétique proposée par les experts du RC serait de substituer aux fossiles les énergies renouvelables afin de diminuer les émissions de GES tout en maintenant notre « production » énergétique. La deuxième dimension est d’améliorer notre système de production grâce à « l’efficacité énergétique ».

¹⁷⁰ BMWI. (2016). *Green Paper on Energy Efficiency* (p. 7;). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/green-paper-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=3

1.3.4 Efficacité énergétique

Il se pourrait que l'on puisse réduire l'usage des fossiles grâce à l'efficacité énergétique. L'efficacité énergétique, qualifiée de « cinquième combustible » (Owen, D., 2013 :90)¹⁷¹ est définie comme **l'amélioration du rendement énergétique**.

Pour poser les jalons, le GIEC emploie le « facteur 4 » (FNH, s.d. : 3)¹⁷² qui « désigne l'objectif d'un pays de diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre (GES) entre le niveau de 1990 et celui de 2050 » (FNH, s.d. : 3). L'objectif du facteur 4 n'est pas de réduire par 4 la consommation mais de multiplier par quatre la productivité des ressources, afin d'acquies un gain énergétique en réduisant la quantité énergétique mobilisée pour répondre aux mêmes besoins. On créerait donc un découplage entre la croissance économique et le matériel requis pour l'entraîner, tel qu'il a été question au paragraphe 1.3.2.2, « de manière à permettre un doublement de la richesse produite et une réduction de moitié des ressources utilisées » (FNH, s.d. : 3). Autrement dit, l'heure est à la « dématérialisation » (Wernick *et al.*, 1996)¹⁷³ de l'économie.

Pour ce faire, les stratégies de recherche en efficacité énergétique sont variées.

Certains affirment qu'un programme politique est nécessaire. En 2009, la firme de conseil McKinsey estimait qu'un « programme national d'efficacité énergétique pourrait réduire la

¹⁷¹ Owen, D. (2013). *Vert paradoxe* (p. 89;90 210 pages). Montréal: Écosociété.

¹⁷² Fondation pour la Nature et l'Homme [FNH]. (s.d.). *Dematerialisation de l'economie et conservation des ressources naturelles* (p. 3, 4 pages). Sommet mondial sur le développement durable 2002, Ministère des Affaires Etrangères, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Consulté à l'adresse http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_economie_conserv.pdf

¹⁷³ « La dématérialisation se réfère à la réduction de matériel demandé pour satisfaire les fonctions économiques » (Ardenaki, S., Herman, R., & Ausubel, J. (1990). *Dematerialization*. *Phe.rockefeller.edu*. Consulté 4 August 2017, à l'adresse <https://phe.rockefeller.edu/docs/Demat.Tech.Forecasting.pdf>)

consommation finale d'énergie en 2020 de 9,1 milliards de Btu ce qui représente environ 23% de la demande prévue » (Owen, D., 2013 : 90).

D'autre part, pour se libérer du fléau que pose notre production matérielle, la tertiarisation de l'économie, axée sur les services, s'impose. Dans cette optique, les espoirs placés entre les mains des nouvelles technologies, telles que les technologies de l'information (TIC), sont immenses :

« Les TIC (technologie de l'information et des télécommunications) sont appelés à fournir l'accès de l'énergie à des millions de personnes. Par exemple, elles peuvent faciliter la mise en place de compteurs intelligents qui permettent d'établir les factures sur la base de la consommation réelle, ce qui réduit les coûts opérationnels des fournisseurs tout en donnant aux pauvres une plus grande flexibilité de paiement. Elles permettent aussi [...] d'aider des centaines de millions de personnes à vivre mieux en leur donnant accès aux services financiers et d'utiliser l'analyse de données ainsi que la combinaison de la demande, de l'offre et de la gestion du stockage pour faire baisser les coûts d'évaluation, d'entretien et de fonctionnement. »¹⁷⁴

Par ailleurs, la recherche et développement permettrait de développer des techniques qui permettraient, dans le secteur industriel par exemple, de réduire les pertes énergétiques lors de la conversion. Aussi, cette recherche d'efficacité s'établirait grâce à la mise en place de système de recyclage. Ce concept repose sur la ré injection de biens utilisés - qui détiennent une certaine quantité d'énergie utilisable – dans le système énergétique afin de créer de nouveaux biens et services. D'autre part, concernant le secteur résidentiel, on pourrait optimiser à la fois la consommation d'appareils énergivores grâce à des progrès techniques, et leur utilisation, en les débranchant lorsqu'ils ne sont plus utilisés (Owen, D., 2013).

¹⁷⁴ L'objectif de développement durable relatif à l'énergie et les technologies de l'information et de la communication. (2016). *UN Chronicle*, 52(3). Consulté à l'adresse <https://unchronicle.un.org/fr/article/l-objectif-de-d-veloppement-durable-relatif-l-nergie-et-les-technologies-de-l-information--0>

Ces gain permettront ainsi « des économies d'énergie dans la production, la conversion et l'utilisation finale de l'énergie [...] ce qui permettra de réduire les émissions de dioxyde de carbone, qui est le principal gaz à effet de serre, tout en améliorant les résultats économiques globaux, en abaissant d'autres émissions polluantes et en augmentant la sécurité » (IPCC, 1992 :130).

Pour rendre compte des gains en efficacité énergétique obtenus, le premier indice de mesure utilisé est le rendement énergétique des appareils utilisés (le nombre de joule utile en bout de ligne par rapport aux nombres de Joules mobilisés (TFC/TPES). On l'utilise par exemple dans l'efficacité des ampoules. Celles-ci sont dimensionnées en vue de fournir autant des lumens (la lumière perçue par l'homme et nécessaire à nous éclairer) avec moins d'énergie mobilisée. Pour mesurer son efficacité et informer l'utilisateur, l'efficacité des ampoules est classée par catégorie :

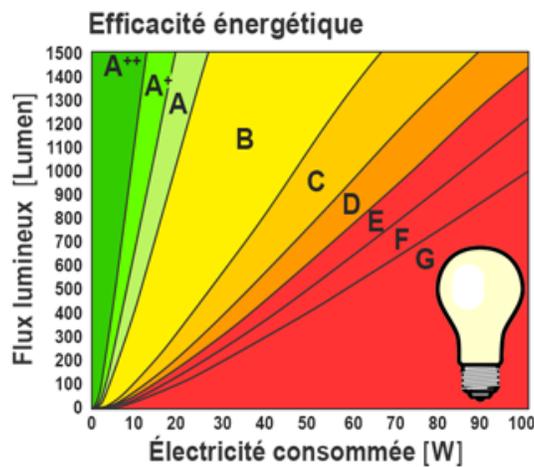


Figure 25. Efficacité énergétique d'une ampoule

Source : Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement (s.d.)¹⁷⁵

Quels sont les résultats? D'après les données de l'AIE, un potentiel de diminution de la consommation d'énergie existe pour chaque secteur. Par exemple, entre 2000 et 2013, elle a estimé à 12 000 PJ le gain énergétique en Allemagne, dont le plus important a été décerné au secteur résidentiel, puis aux services et à l'industrie :

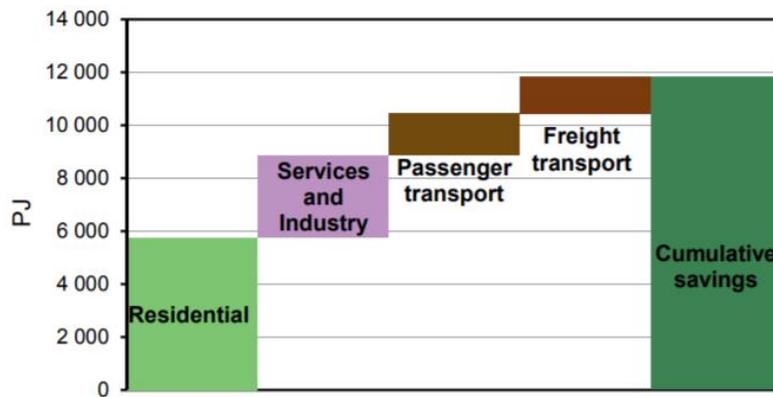


Figure 26. Estimée de réduction de la consommation d'énergie [PJ] par secteur entre 2000 et 2013, en Allemagne

Source : Agence internationale de l'énergie [AIE], 2016 : 62¹⁷⁶

Le deuxième indice de mesure est l'intensité énergétique (quantité de dollars créés pour une quantité de Joules mobilisée). C'est le ratio entre la consommation d'énergie et le produit

¹⁷⁵ Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement (s.d.). *Ampoules et lampes – energie-environnement.ch*. Energie-environnement.ch. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://www.energie-environnement.ch/maison/eclairage-et-piles/ampoules-et-lampes>

¹⁷⁶ Estimée de réduction de la consommation d'énergie [PJ] par secteur entre 2000 et 2013, en Allemagne, Source : Agence Internationale de l'Énergie [AIE]. (2016). *Energy Efficiency Indicators* (p. 62, 144 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyIndicatorsHighlights_2016.pdf

intérieur brut (PIB). Cette grandeur s'exprime en tonnes équivalent pétrole par million de dollars (tep / M\$). Elle représente la quantité d'énergie nécessaire pour produire une valeur monétaire (un dollar, un euro) de biens ou services (Jancovici, 2014)¹⁷⁷. L'intensité énergétique de l'économie semblerait diminuer depuis le commencement de l'ère industrielle, ce qui revient à dire que l'efficacité énergétique a augmenté (Jancovici, 2014). Comme le souligne Jancovici, « depuis quelques décennies, on observe qu'il faut moins de « kilowattheure » pour produire « un dollar » » (2014). Depuis 1990, l'intensité énergétique mondiale aurait en moyenne diminué de 32%.

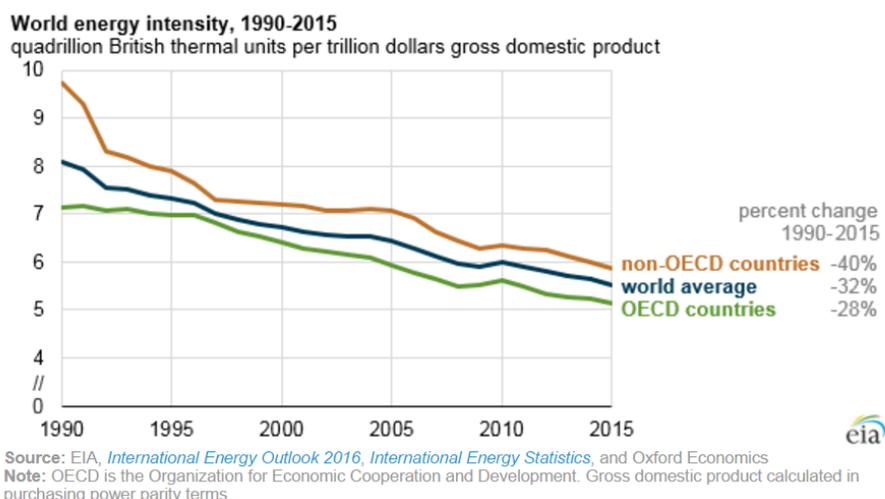


Figure 27. Intensité énergétique entre 1990 et 2015 dans le monde

Source: EIA, 2016¹⁷⁸

Ainsi, ces études montrent que les gains en efficacité énergétique sont potentiellement importants et pourraient répondre aux objectifs du GIEC. D'ailleurs, on en aperçoit les premiers effets depuis 1990 (figure 33). De plus, comme nous l'avons souligné à la lumière

¹⁷⁷ Jancovici, J. (2014). *Qu'est-ce que l'équation de Kaya ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://jancovici.com/changement-climatique/economie/quest-ce-que-lequation-de-kaya/>

¹⁷⁸ EIA. (2016). *Global energy intensity continues to decline*. (2016). *Eia.gov*. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27032>

des conclusions de la firme McKinsey, le GIEC incite les gouvernements à établir des outils qui permettraient le développement des ER et l'établissement de ces gains en efficacité énergétique tant attendus.

1.3.5 Stratégies pour favoriser ces deux phénomènes

Afin de développer l'efficacité énergétique et les technologies propres, les gouvernements proposent de mettre en place des **moyens financiers**. Il s'agit d'incitatifs financiers sous forme de crédits d'impôts, de garanties et de prêts pour encourager l'utilisation de ces technologies. Le cas de l'Allemagne est intéressant. Le gouvernement a voté une loi dotée d'un tarif de rachat, que nous expliquerons plus en détail au chapitre 3, et qui va permettre un essor formidable des ER, telles que le photovoltaïque :

« Si avec près de 3000 MW en 1998 le pays possédait déjà la première puissance éolienne installée dans le monde, la loi de 2000 va accélérer l'essor. En quelques années, la capacité éolienne installée est multipliée par six pour dépasser 18 000 MW dès 2005. Les investissements dans les autres sources d'énergie renouvelables, aux technologies plus coûteuses comme le photovoltaïque [...] Doté d'un tarif d'achat très généreux de 50,62 centimes d'euro en 2000 [...] il s'est alors produit une explosion d'investissements dans le photovoltaïque dont la capacité a progressé à un rythme effréné [...] Alors que la capacité photovoltaïque est d'environ 1100 MW en 2004, elle atteint 6500 MW en 2009 pour se hisser à 35 700 MW fin 2013» (Deshaie, M., 2014)¹⁷⁹

Il s'agit, sous une forme plus coercitive, de mettre en place une « **tarification du carbone** » afin d'inclure aux produits et services un coût lié à la production de GES; ou bien « un système de plafonnement et d'échanges de **droits d'émissions** de GES » entre émetteurs (Leclerc, G. 2016), 2016 : 6)¹⁸⁰.

¹⁷⁹ Deshaie, M. (2014). *Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne*. (note 5). Vertigo, 14(3). doi:10.4000/vertigo.15515

¹⁸⁰ Leclerc, G. (2016). *Chapitre 4 - Marché du Carbone : portrait et enjeux* (p. 6, 49 pages). Montréal. Consulté à l'adresse http://www.vgq.gouv.qc.ca/fr/fr_publications/fr_rapport-annuel/fr_2016-2017-CDD/fr_Rapport2016-2017-CDD-Chap04.pdf

Par ailleurs, à la lumière du rapport Brundtland et comme le souligne chaque année les Conférences Internationales sur les changements climatiques, **l'aide au développement** permettront d'aider les pays les plus vulnérables face à l'adaptation aux CC (Bibeau, M., 2016), de « réduire la pauvreté » (2), de faire la « promotion des technologies propres » (12) ou encore de « favoriser une croissance économique durable » (19)¹⁸¹.

1.4 Conclusion du chapitre 1

L'essentiel de nos besoins énergétiques sont comblés par les hydrocarbures. Cependant, ceux-ci sont en voie d'épuisement et leur combustion produit des GES qui engendrent un dérèglement climatique et menace notre existence.

Si nous voulons éviter notre autodestruction et maintenir notre mode de production, nous une transition énergétique s'impose. Dans une perspective de développement durable, celle-ci a pour objectif une sortie progressive des énergies fossiles tout en maintenant une croissance économique.

Sur le plan théorique, il est possible de diminuer la production matérielle, soit par les gains de productivité, soit par la création de valeur monétaire grâce à la dématérialisation de l'économie.

Sur le plan pratique, les stratégies ainsi avancées par les experts de ces enjeux environnementaux reposent principalement sur **des solutions technologiques** dont les gouvernements pourraient inciter leur déploiement. Les technologies vertes de conversion des sources d'énergies renouvelables (soleil, vent, eau) en énergie utilisable, le stockage et la capture du CO₂, l'électrification des transports, l'efficacité des systèmes, la géo-ingénierie, les

¹⁸¹ Bibeau, M. (2016). *Rapport au parlement sur l'aide au développement officiel du gouvernement du Canada 2015-2016* (p. 2, 49 pages). Ottawa: Marie-Claude Bibeau. Consulté à l'adresse http://international.gc.ca/gac-amc/assets/pdfs/publications/daaa-lrmado_1516_rapport.pdf

TIC ou la tertiarisation de l'économie sont autant de solutions qui répondront à la crise environnementale en diminuant l'utilisation en amont des ressources fossiles (IAE, 2015).

Le pari est donc d'accomplir cette transition énergétique sans renoncer à notre mode de vie en misant sur 1) la recherche d'efficacité énergétique; et 2) l'utilisation des ER.

Mais est-ce vraiment possible?

Chapitre 2. Quels sont les principaux défis que pose la transition?

« S'intéresser à la protection de l'environnement et à l'écologie sans mettre en question le progrès technique, la société technicienne, la passion de l'efficacité, c'est engager une opération non seulement inutile, mais fondamentalement nocive. »

Jacques Ellul

Les défis que pose la transition énergétique sont nombreux et variés. Ils sont aussi bien d'ordre politique qu'économique, sociologique, psychologique, culturel, etc. À eux seuls, ces obstacles pourraient bien empêcher le succès de la transition. Mais nous ne les explorerons pas ici. Nous voulons examiner en particulier une autre sorte d'obstacles, très peu évoquée, excepté par des spécialistes de l'énergie. Il s'agit des obstacles qui tiennent 1/ aux rapports que ces énergies entretiennent avec la dynamique économique de nos sociétés et 2/ aux caractéristiques physiques des énergies que nous mobilisons.

Les paragraphes 2.1 et 2.2 rassemblent les objections face à la théorie économique standard évoquée au chapitre 1. Le paragraphe 2.1 est une réponse théorique. Le paragraphe 2.2 est une objection d'ordre empirique.

Le paragraphe 2.3 tentera de répondre, par oui ou non, si l'accomplissement de la transition énergétique est physiquement possible grâce aux ER. Pour cela, nous nous intéresserons à leurs caractéristiques physiques.

2.1 Objections théoriques à la théorie économique de la croissance

*« C'est cependant une illusion de la pensée linéaire,
de la mythologie moderne du progrès et du développement
que de croire cette abondance sans conséquence écologique et sans limites »*

Georgescu-Roegen, 1995

2.1.1 La théorie économique de la croissance néglige les lois de la thermodynamique

Sur le plan théorique, certains penseurs s'opposent à la théorie économique standard évoquée au chapitre 1. C'est le cas du courant de pensée de l'écologie économique. Mais avant de l'exposer, approfondissons la théorie économique de la croissance étudiée au chapitre 1, en s'appuyant sur le modèle théorique de Solow, appartenant au modèle économique orthodoxe.

2.1.1.1 Modèle de Solow : substituer du capital artificiel au capital naturel

Nous avons vu au chapitre 1 que la croissance « résulte de l'augmentation continue des facteurs accumulables »¹⁸². Il y a deux formes de facteur accumulables : le capital humain et le capital physique.

- Le capital humain – le volume et la qualité de la main d'œuvre – est un facteur accumulable dans le sens où les capacités productives d'un individu peuvent augmenter (connaissance, qualité du travail, nombre d'individus).

¹⁸² Croissance, n.f., *Dictionnaire de l'économie*, Encyclopédia Universalis, sous la dir. de Jézabel Couppey-Soubeyran, Albin Michel, 2007, (p.289), Paris.

- Le capital physique – matériel et immatériel – fait lui aussi l'objet d'une production accumulable, traduit par l'utilisation d'un nombre d'outils de production toujours plus élevé¹⁸³. Pour les économistes classiques (Ricardo, Marx, Smith), la croissance résulte principalement de cette accumulation¹⁸⁴.

La productivité respective et combinée de ces deux facteurs reste limitée. En effet, il arrivera un moment où « la productivité du capital par travailleur tendra à diminuer au fur et à mesure de l'accumulation du capital »¹⁸⁵. Cet état décrit la loi des rendements décroissants¹⁸⁶ que suit la fonction de production. Celle-ci prend la forme d'un « U » inversé dont le point optimum est celui qui précède le moment où le recours à un facteur de production supplémentaire pour créer un service ou produit se traduit par un gain de production (la richesse matérielle produite) plus faible que celui créé juste avant. En termes économiques, ce point optimum est l'état stationnaire précédant celui où le coût marginal¹⁸⁷ est plus grand et le bénéfice marginal¹⁸⁸ plus petit. Par exemple, « le fait d'avoir un nombre d'ordinateurs plus important augmente la production du personnel. Cependant, au fur et à mesure que le nombre d'ordinateur augmente, le surcroît de production tend à diminuer si le nombre d'employé reste constant »¹⁸⁹. L'économiste Ricardo donnait l'exemple de la terre comme facteur limitant dans le secteur agricole¹⁹⁰. Ainsi, pour l'économiste Solow, la croissance économique tend inévitablement vers un état stationnaire, dû à ces facteurs de production limitants.

¹⁸³ Jézabel Couppey-Soubeyran (éd.), *op. cit.*, p. 289.

¹⁸⁴ *Ibid.*, p. 289.

¹⁸⁵ *Ibid.*, p. 291

¹⁸⁶ Elle est établie lorsque l'utilisation de facteurs de production supplémentaire se traduit par un gain de production de plus en plus faible. Plus on ajoute de l'équipement, plus l'apport de chaque machine est faible (Couppey-Soubeyran, 2007).

¹⁸⁷ « Coût de la dernière unité produite » (Couppey-Soubeyran, 2007 : 230)

¹⁸⁸ Bénéfice de la dernière unité produite.

¹⁸⁹ *Ibid.*, p. 291.

¹⁹⁰ *Ibid.*, p. 291.

Or, en observant que la croissance n'a cessé d'augmenter au cours du 20^{ème} siècle, Solow se pose la question du facteur qui permet de contrer la loi des rendements décroissants. Il y aurait une autre source de croissance : celle du progrès technique. Le premier modèle de croissance néo-classique, qui s'inscrit dans la logique d'accumulation du capital physique, montre que la production accumulable est **toujours** possible grâce au progrès technique. Celui-ci est considéré alors comme une autre forme d'accumulation, dans la mesure où il augmente la productivité du capital physique (biens et équipement), c'est-à-dire améliore en continu son rendement. Ainsi, pour Solow, le « progrès technique » est le « principal facteur de la croissance à long terme »¹⁹¹ et c'est par ce facteur que nous pourrions connaître une croissance infinie.

Si le progrès technique est le principal facteur de croissance, qu'en est-il de nos ressources énergétiques fossiles qui, comme nous l'avons vu plus haut, entretiennent un lien très étroit avec l'évolution du PIB réel? Celles-ci ne sont étonnamment pas prises en compte dans la fonction de production (Daly, 1997)¹⁹². Pourquoi? Car Solow établit une fonction de substitution entre ces ressources naturelles et le capital physique.

Qu'est-ce qu'une relation de substitution entre ces deux facteurs? Si on reprend la définition de base de la substituabilité, on peut dire que si les ressources naturelles sont substituables au capital physique, alors « pour un niveau de production donné » (Albertini et Silem, 2010)¹⁹³, on gardera la même valeur économique même si une certaine quantité de ressources naturelles s'épuise, car celle-ci sera remplacée par une quantité (variable) du capital physique (Albertini,

¹⁹¹ Jézabel Couppey-Soubeyran (éd.), *op. cit.*, p. 289.

¹⁹² Daly, H. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3), pp.261-266. doi:10.1016/s0921-8009(97)00080-3.

¹⁹³ Albertini, J., & Silem, A. (2010). *Lexique d'économie* (11th éd., p. 245; 247; 347; 412; 791). Dalloz - Lexiques.

& Silem, 2010). Stiglitz, dans son manuel d'économie (Stiglitz, Walsh, & Lafay, 2014 : 938), donne la définition suivante de « substituts » : « deux biens sont des substituts si la demande pour l'un s'accroît lorsque le prix de l'autre augmente ». Donc si les ressources naturelles venaient à manquer, toute autre chose étant égale, la substitution aura pour effet d'augmenter la demande du capital physique en remplacement des ressources naturelles dont le prix relatif aurait augmenté (Albertini & Silem, 2010 : 791).

Comme nous l'avons vu, l'augmentation de la productivité des facteurs accumulables est le facteur principal pour la pérennité de la croissance. En établissant une relation de substituabilité entre les ressources naturelles et le capital artificiel, on supprime les facteurs limitants et on rend donc possible une croissance infinie. Grâce au progrès technique, les rendements vont pouvoir croître de telle manière que le recours aux énergies fossiles ne sera plus nécessaire pour pérenniser la croissance. C'est l'idée d'efficacité énergétique présentée au Chapitre 1, dont l'objectif est de créer plus de valeur économique avec moins d'énergie. Nous n'aurions par ailleurs plus à nous soucier de leur épuisement car il sera possible de les substituer par des nouvelles technologies. Cela reviendrait à penser que la croissance économique tendrait vers un système « endogène », c'est-à-dire qu'elle serait un « processus auto-entretenu reposant sur l'hypothèse de rendements croissants avec une productivité du capital indépendante du stock en capital naturel » (Albertini & Silem, 2010 : 247).

2.1.1.2 L'objection théorique de Daly et Georgescu-Roegen : capital naturel et artificiel ne sont pas substituables, mais complémentaires.

Sur le plan théorique, l'économiste Herman Daly du courant de pensée de l'écologie économique conteste le modèle de Solow. Selon lui, on ne peut remplacer à l'infini des ressources naturelles par du capital artificiel. Il est impossible de faire un gâteau sans farine, malgré une cuisine contenant de plus en plus d'ustensiles et un four de plus en plus grand :

—Since the production function is often explained as a technical recipe, we might say that Solow’s recipe calls for making a cake with only the cook and his kitchen. We do not need flour, eggs, sugar, etc., nor electricity or natural gas, nor even firewood. If we want a bigger cake, the cook simply stirs faster in a bigger bowl and cooks the empty bowl in a bigger oven that somehow heats itself.” (Daly, H., 1997 : 261)

S’appuyant sur la 1^{ère} loi de la thermodynamique qui est la loi de conservation de l’énergie, Daly défend la thèse que nous avons une quantité finie de ressources naturelles et que, contrairement à la thèse de Solow, ces ressources sont l’essence de toute création de richesse. C’est ce qu’il appelle le capital naturel. Le capital artificiel, quant à lui, comme le souligne le graphique de Jancovici, n’est autre « qu’une rétroaction positive interne au système, constituée de travail et de ressources passées » (Jancovici, 2015)¹⁹⁴.

En effet, une machine est créée en amont grâce à des ressources naturelles et à du travail humain. Ainsi, le progrès technique reposerait sur cet apport.

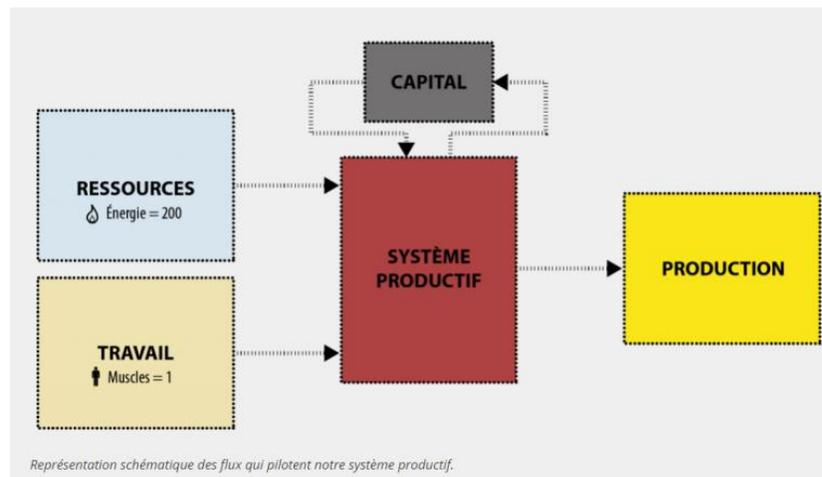


Figure 28. Intrants et extrants du système productif. Source : Jancovici, 2015¹⁹⁵

¹⁹⁴ Jancovici, J. (2015). *L'énergie, de quoi s'agit-il exactement ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté à l'adresse <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/te/ENRE/3/EconomieEcologique.pdf>

¹⁹⁵ Jancovici, J. (2015). *L'énergie, de quoi s'agit-il exactement ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté à l'adresse <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/te/ENRE/3/EconomieEcologique.pdf>

Ce qui fait la grande différence entre la thèse de Solow et celle de Daly c'est qu'en distinguant la richesse matérielle¹⁹⁶ des ressources naturelles, Herman Daly établit une **relation de complémentarité** entre ces deux facteurs.

Qu'est-ce qu'une relation de complémentarité? En économie, « deux biens sont complémentaires si la demande pour l'un (à un prix donné) baisse à mesure que le prix de l'autre augmente » (Stiglitz J, Walsh C., & J., Lafay, 2014 : 929). Ainsi, « il y a complémentarité entre un bien (ou service) A et un bien (ou service) B si l'utilisation du facteur A entraîne une variation de même sens que celle du facteur B » (Albertini, J., & A. Silem, 2010 : 247). Si le stock en capital naturel est complémentaire au stock en capital artificiel (la richesse matérielle) créé, alors plus nous produisons de richesse matérielle, plus nous mobilisons des ressources naturelles, et plus le stock en capital naturel s'épuise. Plus celui-ci s'épuise, plus son flux¹⁹⁷ (son écoulement) devient faible. Ainsi, le flux grandissant du capital artificiel nécessaire pour alimenter le progrès technique et la croissance demande inéluctablement un flux croissant de ressources naturelles.

De ce fait, Herman Daly introduit à la fonction de production¹⁹⁸ de Cobb-Douglas, un paramètre supplémentaire, celui de **l'écoulement des ressources naturelles** :

$$Q = K^{a1} \times R^{a2} \times L^{a3}$$

Avec :

¹⁹⁶ La richesse matérielle désigne à la fois le capital artificiel servant à produire un bien ou un service et le bien/service produit

¹⁹⁷ Puisque la première loi de la thermodynamique postule que le stock naturel ne peut que se transformer, il est fondamental pour Herman Daly de distinguer des **stocks** qui sont des quantités (quantité de ressources, travail, quantité de produits/services) et des **flux** qui sont des « mouvements » (Albertini, J., & A. Silem, 2010 : 412).

¹⁹⁸ $Q = cK^a \times L^b$ où Q correspond à la production, K au stock en capital [\$], L à la force de travail. C, a et b sont des constantes déterminées par la technologie.

Q, la production.

K, le stock en capital [\$]. C'est le **capital artificiel** tel que les équipements, les machines ou les infrastructures, représenté par le capital dans la figure ci-dessus.

R, l'écoulement de ressources naturelles utilisées pour la production. Il représente le **capital naturel** (les ressources naturelles, telles que les métaux, l'air, le vent ou les combustibles fossiles), ou les « ressources » dans la figure précédente.

L= force de travail.

Et où $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Si nous reprenons l'exemple du chapitre 1, le capital serait les biens d'équipement de l'esthéticienne (locaux, machines), les ressources naturelles seraient tous le flux de matière et d'énergie qui viennent de sources environnementales (pétrole, plantes, produits chimiques) et qui sont transformés par le capital (raffineries, usines chimiques). Le travail représenterait l'ensemble de la force de travail, du conducteur de la foreuse pour aller puiser le pétrole à l'esthéticienne.

Dans l'équation, bien que R (écoulement des ressources naturelles non renouvelables) peut être aussi petit qu'on le souhaite du moment où K (capital matériel) est suffisamment grand, Daly soutient que l'augmentation de K implique que R tend vers zéro ($R \rightarrow 0$), pour des raisons physiques, selon les 1^{ère} et 2^{ème} lois de la thermodynamique. Et puisque les ressources sont des stocks et des flux finis, il arrivera donc, de manière inévitable et quoi qu'on fasse, un moment où nous atteindrons le point optimum. Celui-ci se traduit par le moment où la balance s'inversera, c'est-à-dire que **l'épuisement du stock** des ressources énergétiques traduira un **ralentissement du flux de production**, et donc la fin de la croissance économique. Celle-ci, la fin de la croissance, se produit lorsque la quantité de richesses produites dépasse les ressources naturelles utilisables. Pour certains, nous l'avons déjà atteinte.

On peut ajouter à la thèse de Daly celle de son ancien professeur, Nicolas Georgescu-Roegen, qui est l'un des premiers chercheurs à revendiquer la prise en compte du paramètre

entropique¹⁹⁹ dans la fonction de production. En intégrant à la dimension physique de l'activité économique le paramètre entropique inhérent à la seconde loi de la thermodynamique²⁰⁰, il mesure un **état de dégradation perpétuel et irréversible de la fonction de production**. Pour Georgescu-Roegen, la décroissance est donc une nécessité physique si l'on veut maintenir nos conditions d'existence. La deuxième loi de la thermodynamique vient donc « accentuer » la thèse soutenue par Daly, en exposant que le progrès technique le plus performant ne peut pas faire disparaître l'entropie. Au contraire, il l'accélère (Georgescu-Roegen, 1995).

Dans le prolongement des idées de Roegen, François Roddier fait l'analogie entre la croissance économique de notre société humaine et une structure physique qui suit une loi de dissipation, c'est-à-dire une structure qui tend à dissiper toute son énergie :

« Les pays développés offrent un parfait exemple [...]. Une telle société cherche constamment à s'adapter à un environnement qui évolue de plus en plus vite. Paradoxalement, alors que nous vivons en période d'abondance, le temps libre diminue. Ceux qui ont du travail courent pour ne pas le perdre et ceux qui n'en n'ont pas courent pour en trouver. Pour gagner du temps, on se contente de « fast food »; on prend sans cesse l'avion, le train à grande vitesse ou l'autoroute; notre moindre déplacement se fait en voiture. On a vu que les espèces biologiques soumises à cet effet sont fragiles et tendent à s'éteindre. Un nombre croissant d'individus pense que nos sociétés modernes vont s'effondrer. L'humanité s'inquiète de plus en plus de sa survie. » (Roddier, 2012 : 6-7)²⁰¹

¹⁹⁹ Voir chapitre 1.

²⁰⁰ Georgescu-Roegen considère la Terre comme un système thermodynamique fermé dans lequel toutes les formes d'énergie inhérentes à ce système sont « graduellement transformées en chaleur, et la chaleur en fin de compte devient si diffuse que l'homme ne peut plus l'utiliser » (Georgescu-Roegen, 1995 : 64). Il utilise l'entropie comme étant un « indice de la quantité d'énergie inutilisable contenue dans le système à un moment donné de son évolution » (Georgescu-Roegen, 1995 : 63).

²⁰¹ Roddier, f. (2012). Le syndrome de la reine rouge. *Institut Momentum*. Consulté à l'adresse <http://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2013/10/le-syndr%C3%B4me-de-la-reine-rouge.pdf>

Plus une structure physique va suivre cette loi – économiquement, sa croissance, physiquement, un flux énergétique croissant – plus elle va modifier son environnement. Plus vite une structure dissipative s'adapte à son nouvel environnement, plus vite cet environnement va évoluer : c'est l'effet de rétroaction positive ou « accélération continue de l'évolution » (Roddier, 2012 : 7). Il existe cependant une limite à la pérennité de cette structure. En effet, sa survie dépend de sa capacité à s'adapter à ce nouvel environnement. Comme notre temps d'adaptation est limité²⁰², il arrivera un jour où notre espèce n'aura plus le temps de s'adapter à ce nouvel environnement et s'éteindra. C'est ce que Roddier appelle « **l'effet de la reine rouge** » qui rend compte du fait de devoir « courir le plus vite possible pour rester en place » (Roddier, 2012 : 7).

Finalement, ce qui différencie l'énergie de la croissance économique, ce sont les lois auxquelles elles obéissent. Pour l'énergie, ce sont les lois physiques de la thermodynamique, qui diffèrent des lois économiques. Et quand celles-ci se heurtent à un débat, les lois de la thermodynamique « gagnent à tout coup » (Georgescu-Roegen, 1995, cité par Greer, J., 2013 : 40). Ainsi, en intégrant la dimension physique des deux premières lois de la thermodynamique à l'activité économique, Daly questionne le modèle économique de Solow, qui avance que l'énergie est un facteur limitant la croissance mais que ce facteur limitant serait résorbé par le progrès technique.

2.1.1.3 Conclusion

En résumé, sur le plan théorique, les gains en **efficacité énergétique** créés par le progrès technique reposent sur un **apport énergétique** et ne permettent que très partiellement de

²⁰² Le temps d'adaptation peut se référer à la génétique mais aussi à celui de la culture, ce dernier est « beaucoup plus court, typiquement de l'ordre d'une génération, c'est-à-dire une trentaine d'années » (Roddier, 2012 : 7)

compenser le capital naturel polluant (sources d'énergie fossile) par du capital artificiel, car les deux facteurs sont complémentaires et non substituables.

Pour conclure, Daly montre ainsi que le progrès technique ne permet que partiellement de compenser la dégradation de ressources naturelles. Pour Roegen, c'est l'univers qui tend vers le désordre, inexorablement, sans même l'intervention humaine. Ainsi, produire toujours plus suppose de dégrader toujours plus. Faire croître la production, c'est donc accélérer cette état de dégradation. Bien sûr ce désordre invivable se place sur une échelle de temps très longue. Ce qui permet à Solow et Stiglitz de défendre leur modèle de la croissance continue sur une fenêtre de temps plus courte, de l'ordre de 50-60 ans (OCDE, 2012 : 7)²⁰³. Ainsi, sur cette échelle de temps, qu'est-ce qui peut ralentir la dégradation du stock en capital naturel ? Est-ce que les renouvelables sont la solution sur cet horizon temporel ?

Avant de discuter de cette solution, il faut traiter d'une autre limite à l'efficacité énergétique : les effets rebond.

2.1.2 Effets rebond ou paradoxe de Jevons : la dynamique économique de nos sociétés tend à annuler les économies d'énergie-matière permises par le progrès technique

Les stratégies d'efficacité énergétique sont limitées par des contraintes physiques exprimées par les lois de la thermodynamique. Mais elles sont limitées également par des contraintes propres au fonctionnement de nos économies. Ces contraintes se traduisent par ce que l'on appelle les effets rebonds, ou paradoxe de Jevons. L'effet rebond a été identifié pour la

²⁰³ OCDE. (2012). *Horizon 2060 : perspectives de croissance économique globale à long terme* (p. 7-8). OCDE. Consulté à l'adresse <http://www.oecd.org/fr/eco/perspectives/Horizon%20French%20FINAL.pdf>

première fois par William Stanley Jevons, qui étudiait les défis liés à l'efficacité énergétique dans l'usage du charbon (Alcott, 2015)²⁰⁴. Son livre « The Coal Question », publié en 1865, établissait qu'une meilleure efficacité dans l'usage du charbon menait non pas à une diminution de sa consommation, mais plutôt à une augmentation! « Pour des raisons psychologiques, on s'attend à ce que la diminution de la quantité d'une ressource nécessaire à une unité de production entraîne une baisse de la consommation globale de cette ressource » (Alcott, 2015 :155). En réalité on économise moins que cela. De façon générale, « grâce à la baisse du prix des biens produits et de l'énergie nécessaire à la production, l'énergie momentanément économisée est utilisée par les consommateurs pour faire autre chose » (Alcott, 2015 :156). C'est ce qu'on appelle l'effet rebond. Pour le comprendre, on peut l'imager comme le lancer d'une balle qui, après avoir touché le sol (gain d'efficacité) va rebondir (l'augmentation de la consommation).

« It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuels is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth... Every improvement of the engine, when effected, does but accelerate anew the consumption of coal » (Jevons, cité par Fawkes, 2013 :68)²⁰⁵.

Ce concept a été généralisé par Daniel Khazzoom et Leonard Brookes, qui, dans les années 80, affirment que l'effet rebond est un effet pervers de tout progrès en termes de productivité et d'économie d'énergie (Fawkes, S., 2013 : 68). Cependant, les méthodes pour quantifier ce phénomène étant nombreuses et variant selon divers paramètres socio-économiques (importations d'énergie prise en compte, niveau de vie, mode de consommation, psychologie des consommateurs, etc.), donner une mesure du rebond moyen observé dans le monde est difficile (Alcott, B., 2015 :156). Néanmoins, il est possible de se donner un ordre d'idée qualitatif de son effet; Jevons avance à cet effet trois scénarios possibles.

²⁰⁴ Blake Alcott, « *Effet rebond* », in Giacomo d'Alisa, Federico Demaria, Giorgos Kallis, *Décroissance : vocabulaire pour une nouvelle ère*, Montréal, Écosociété, 2015, pp. 155-159.

²⁰⁵ Fawkes S., *Energy Efficiency*, Gower, 2013.

1/ Rebond > 100%. On observe un vrai « rebond » c'est-à-dire que la consommation d'énergie additionnelle est plus importante que l'énergie sauvée (la balle rebondit plus haut que le niveau où elle a été lancée). On parle alors de « backfire » (Fawkes, 2013 :68), de contre-feu, ou de contre-productivité (Alcott, 2015 :156). Par exemple « si la productivité de la machine à vapeur était restée au niveau atteint par James Watt, nous consommerions beaucoup moins de charbon » (Alcott, B., 2015 :156).

2/ Rebond = 100%. L'effet rebond est égal au gain d'énergie. C'est le cas lorsque « les augmentations de production » ne changent pas la quantité d'énergie mobilisée en amont, qui s'accroît normalement (Alcott, B., 2015). La recherche de productivité est donc inefficace.

3/ Rebond < 100%. Le troisième scénario serait un rebond négatif, c'est-à-dire que le gain d'énergie obtenu n'est pas utilisé à d'autres usages. Plus l'effet rebond se rapproche de 1%, plus la technique de productivité employée est efficace.

Mais de ces trois scénarios, les données montrent que l'effet rebond est d'au moins 100% (Alcott, B., 2015).

De plus, on peut qualifier l'effet rebond selon le secteur et l'échelle économique étudiés. Par exemple, certaines études montrent que dans le secteur résidentiel, l'amélioration de la productivité d'appareils ménagers engendre un effet rebond minime. Mais à l'échelle macro on observe que comme le coût des services énergétiques décline, les ressources libérées permettent aux individus et aux équipements d'amplifier l'activité économique.

Par ailleurs, deux effets sont observables : l'effet rebond direct et indirect (Fawkes, S., 2013).

De manière directe, si le coût diminue, toute autre chose étant égale, la demande est plus importante, ce qui augmente la consommation et annule l'effet positif du gain d'énergie

souhaité (Fawkes, S., 2013). Si une voiture devient plus efficace dans le sens où elle consomme moins d'essence, l'utilisateur aura tendance à augmenter son usage, et faire de plus longues distances. C'est le cas de la consommation aux Etats-Unis et au Canada. Une étude a révélé qu'il y a dix ans, une voiture consommait 11,3 litres d'essence pour parcourir 100 km. Aujourd'hui, après une recherche en efficacité, une voiture ne consomme plus en moyenne que 9,5 litres d'essence pour 100 km. Or, nous sommes face à « une consommation annuelle qui croîtra de 0,5% » selon les prédictions de l'EIA (McKenna, 2017)²⁰⁶. Encore dans le secteur des transports, des avions plus efficaces permettront de réduire le coût du billet, ce qui mènera à une augmentation de la demande et donc à une augmentation de la consommation de carburant. Un autre exemple probant réside dans l'éclairage. Un consommateur qui installe des ampoules moins énergivores aura tendance à laisser les lumières allumées plus longtemps ou bien à en utiliser plus (Fawkes, 2013).

D'une manière indirecte, les économies réalisées grâce à des progrès en matière d'efficacité énergétique vont bien souvent permettre de consommer d'autres services consommateurs d'énergie. Prenons l'exemple classique d'un moteur plus efficace. Il permettra d'économiser de l'essence, donc c'est de l'argent dont le consommateur se servira pour s'offrir un billet d'avion pour Cuba en fin d'année, ce qui réduira à néant l'économie d'énergie permise en principe par le moteur de voiture plus efficace. C'est le cas aussi des nouveaux réfrigérateurs plus efficaces. Les consommateurs ont tendance à acheter des frigos plus grands, et à abandonner leur ancien réfrigérateur dans la cave, ce qui revient à augmenter la consommation globale (Fawkes, 2013).

²⁰⁶ McKenna, A. (2017). *Les ventes de carburant à un niveau record: consommer moins, mais rouler plus* | *Actualités*. La Presse. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <http://auto.lapresse.ca/actualites/201703/21/01-5080807-les-ventes-de-carburant-a-un-niveau-record-consommer-moins-mais-rouler-plus.php>

Finalement, d'un point de vue économique, on peut dire que si tout gain d'énergie d'un bien fait baisser son coût, et donc son prix, cette économie d'énergie en « jachère » (Alcott, 2015 :156) est en fait utilisée par les consommateurs pour d'autres utilités.

D'un point de vue psychologique, l'effet rebond est expliqué par l'exigence imposée par nos sociétés productivistes « à ne rien laisser inemployé de l'énergie théoriquement consommable gisant dans les sous-sols » (Alcott, 2015 :156).

Durant les dernières décennies, on observe bien un gain de productivité, c'est-à-dire qu'une heure de travail ou un joule d'hydrocarbure mobilisé servent à produire plus de biens et services qu'avant. Mais en contrepartie, aucune baisse de la consommation globale n'a été enregistrée. Alcott souligne de manière très juste que l'économie est liée à l'effet rebond : « Aucun historien ni économiste ne dit autre chose : une productivité accrue ne peut signifier que plus de croissance économique et de créations d'emploi » (Alcott, 2015 :156).

L'effet rebond est donc inévitable dans une société productiviste. Les économies de ressources qui peuvent être réalisées grâce au progrès technique risquent toujours d'être annulées par la tendance à produire et consommer toujours plus. David Owen soutient que l'augmentation de l'efficacité s'avère donc inutile face à la dégradation de l'environnement si elle n'est pas couplée à des mesures qui forceraient la diminution de la consommation.

2.2 Objections empiriques à la théorie économique de la croissance.

Dans le paragraphe précédent, nous soutenons donc, en prenant appui sur des travaux d'économistes, qu'une croissance économique continue est théoriquement impossible. Par ailleurs, les données empiriques dont nous disposons concernant les rapports entre croissance, progrès technique et utilisation des ressources naturelles révèlent que, jusqu'à présent, nous ne sommes pas capables d'obtenir un découplage absolu entre croissance économique et impact

écologique. Cela ne nous dit pas ce que sera l'avenir, mais incite au moins à la prudence concernant les projets de transition énergétique qui nous intéressent dans ce mémoire.

2.2.1 Indices possibles des limites au progrès technique

Il apparaît que le rendement énergétique aurait tendance à stagner dans certains secteurs. Ce qui est le cas pour le secteur des transports aux US, dont on voit une amélioration du rendement énergétique (augmentation du nombre de km parcourus par Btu dépensés) de plus en plus faible :

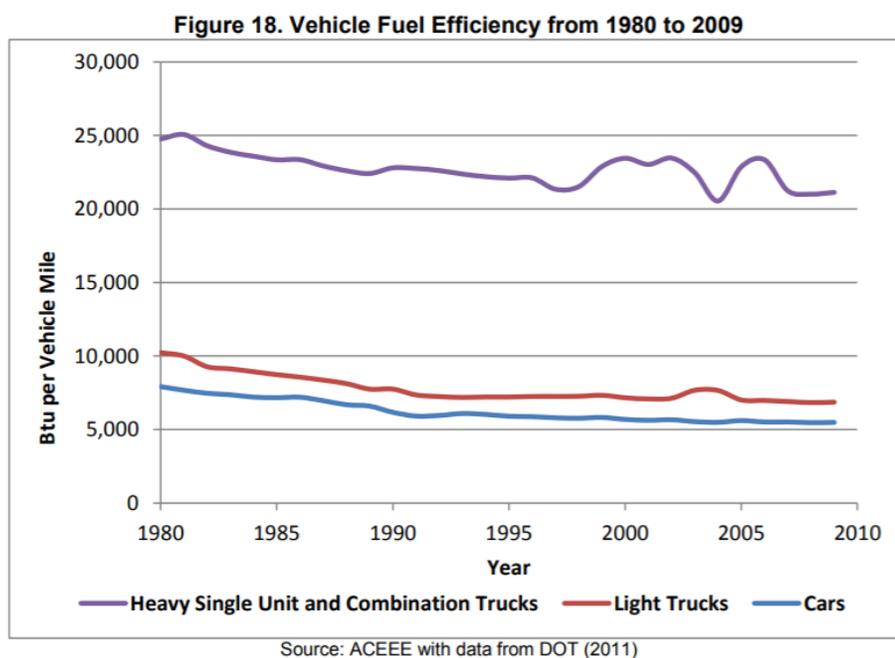


Figure 29. Stagnation de l'efficacité des véhicules à essence

Source : John, Nadel & Siddiq Kahn, 2012²⁰⁷

²⁰⁷ John, A., Nadel, S., & Siddiq Kahn, A. (2012). *The long-Term Energy Efficiency Potential* (p. figure 18 "Vehicle Fuel Efficiency from 1980 to 2009", p.47). Washington: American council for an energy-efficient economy. Consulté à l'adresse https://www.garrisoninstitute.org/downloads/ecology/cmb/Laitner_Long-Term_E_E_Potential.pdf

La figure ci-dessous présente l'intensité énergétique²⁰⁸ dans les pays développés. Là où l'on pourrait croire que l'intensité énergétique s'accroît, « on constate en effet qu'elle s'est nettement améliorée pour l'ensemble de ces pays sur la période 1980-2000, mais que depuis les années 2000, le rythme moyen d'amélioration s'est ralenti » (Union française de l'électricité, 2017). Ce qui laisserait penser qu'il est de plus en plus difficile de produire autant avec moins d'énergie (ou plus, avec autant d'énergie).

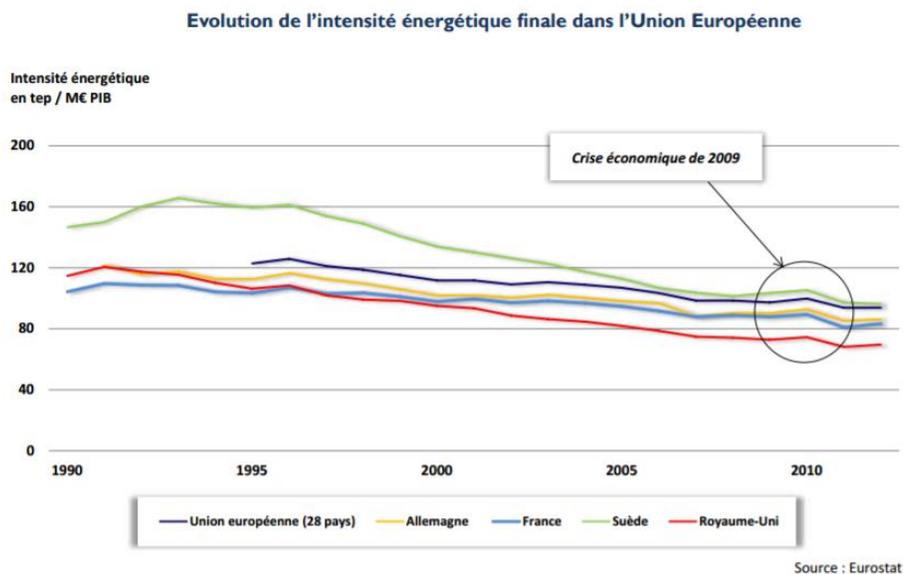


Figure 30. Evolution de l'intensité énergétique finale dans l'Union Européenne, entre 1990 et 2012

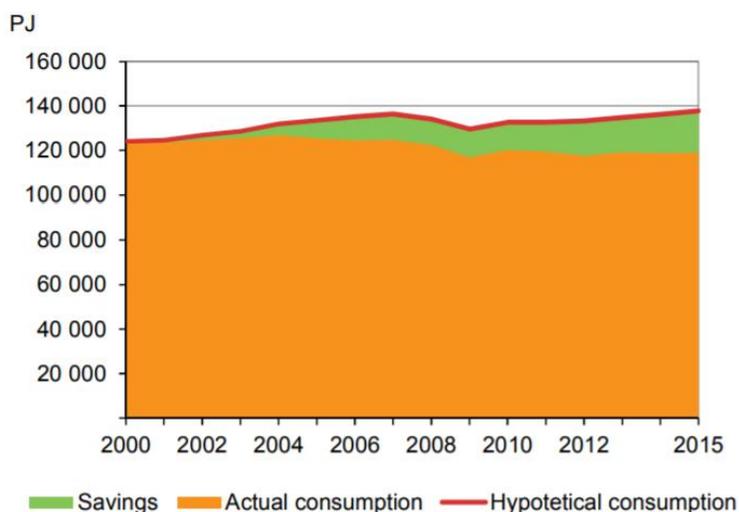
Source : Union Française de l'électricité, 2014²⁰⁹

²⁰⁸ Quantité de dollars créée par quantité d'énergie investie, dont la définition est donnée dans le paragraphe 3 du Chapitre 2.

²⁰⁹ Union Française de l'électricité. (2014). *L'intensité énergétique* (p. 1, 2 pages). UFE. Consulté à l'adresse <http://ufe-electricite.fr/IMG/pdf/8.pdf>

Enfin, le graphique ci-dessous nous montre que l'efficacité est sans doute une stratégie nécessaire et qu'elle ne pourra « dématérialiser l'économie » dans une moindre mesure car, comme on le constate ici, son impact reste faible par rapport à la consommation actuelle qui ne fait que croître :

Figure 16. Estimated energy efficiency savings in IEA



Source: adapted from IEA Energy efficiency market report, 2016, based on IEA energy efficiency indicators database.

Figure 31. Economie d'énergie estimée grâce à l'efficacité énergétique dans le monde

Source : Agence internationale de l'énergie [AIE], 2016: 10²¹⁰

Concernant l'économie tertiaire, celle qui regroupe les services (dont le commerce, l'éducation, la santé etc.), elle est considérée comme opposée à l'entropie. De ce fait, « la richesse tertiaire » pourrait « augmenter indéfiniment avec le temps ». Or, « ignorer que l'entropie agit sur l'économie primaire de la Nature destine la pensée économique dominante à

²¹⁰ Agence Internationale de l'Énergie [AIE]. (2016). *Energy Efficiency Indicators* (p. 10, 144 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté à l'adresse https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyIndicatorsHighlights_2016.pdf

une succession d'échecs de plus en plus rapide » (Greer, 145). En effet, si l'on prend l'exemple de l'économie de l'information, qui dépend en grande part de l'économie industrielle, on voit que « plusieurs activités qui la soutiennent sont impossibles dans un monde moins centralisé ou à un niveau technologique inférieur » (Greer, J., 2013 : 157). Il est important de signaler que « l'utilisation des moyens dématérialisés que sont l'informatique et les télécommunications n'évite en général aucune pression matérielle sur l'environnement. Fabriquer un ordinateur revient à dépenser entre 2 000 et 10 000kWh, soit 200 à 1 000 litres d'essence (Jancovici, J., 2013 : 46)²¹¹. Comme le dit Greer, « notre machine, l'internet, dépend "d'un substrat physique" important » (Greer, J., 2013 : 155). En amont de son utilisation, il existe un réseau d'approvisionnement « qui va des mines de charbon aux centrales et des puits de pétrole au diesel qui sert de carburant aux trains et aux excavatrices » (Greer, 2013 : 157) pour faire fonctionner les fermes de serveurs et le gigantesque réseau électrique transcontinental nourri par l'électricité (Greer, 2013 : 157).

2.2.2 Pas de croissance économique sans croissance de la consommation d'énergie

Les projets de transition énergétique reposent sur l'idée qu'il est possible de réduire l'utilisation des fossiles sans baisse de nos capacités de production, donc sans décroissance économique. Or, sur le plan empirique, on constate que le taux de croissance d'une économie est étroitement lié à la quantité d'énergie mobilisée : on ne peut pas faire croître une économie sans mobiliser toujours plus d'énergie. Par ailleurs, l'extraordinaire croissance économique qu'a connue notre civilisation semble étroitement liée à l'usage de certaines sources d'énergie particulière : les hydrocarbures.

« La première «révolution marchande» des 12ème et 13ème siècles, qui permit à l'Europe de sortir de la féodalité rurale, coïncide avec la généralisation des moulins à eau et à vent. Une nouvelle source

²¹¹ Jancovici, J. (2013). *Transition énergétique pour tous* (p. 46, 240 pages). Odile Jacob.

énergétique, en plus de la photosynthèse (agriculture) et de la force animale, devenait disponible. De même, qui peut nier que la découverte des applications industrielles du charbon, puis du gaz et du pétrole (et, plus récemment, de l'atome) a joué un rôle décisif dans la révolution industrielle, et partant, comme moteur de la croissance?» explique Gaël Giraud (cité par Auzanneau (2014))²¹².

Selon une perspective historique, l'«indissoluble liaison» qui s'est bâtie entre un apport énergétique abondant²¹³, «le système technicien» et le «capitalisme mondial» a donné naissance à la révolution thermo-industrielle dès la fin du 18^{ème} siècle. L'invention de la machine à vapeur de James Watt, en 1784, «des métiers à filer ou à tisser semi-automatiques marque un accroissement considérable de la productivité (Stanford, J. 2011 :70)²¹⁴. Celle-ci a entraîné, comme en témoigne la figure ci-dessous, un «saut de puissance» (Jancovici, J., 2013)²¹⁵ économique «sans autre antécédent comparable dans l'histoire humaine» (Deléage, J. 2014 :15)²¹⁶.

²¹² Auzanneau, M. (2014). Gaël Giraud, du CNRS : « *Le vrai rôle de l'énergie va obliger les économistes à changer de dogme* ». Oil Man. Consulté le 4 août 2017, à l'adresse

<http://petrole.blog.lemonde.fr/2014/04/19/gael-giraud-du-cnrs-le-vrai-role-de-lenergie-va-obli-ger-les-economistes-a-changer-de-dogme/>

²¹³ Abondant dans le sens de sa facilité d'accès et sa forte concentration.

²¹⁴ Stanford, J. (2011). *Petit cours d'autodéfense en économie* (p. 70, 476 pages). Lux

²¹⁵ Jancovici, J. (2013). Combien suis-je un esclavagiste? *Jean-Marc Jancovici*. Consulté à l'adresse <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/combien-suis-je-un-esclavagiste/>

²¹⁶ Deléage, J. (2014). *Les servitudes de la puissance : conflits de classe autour de l'énergie*. *Ecologie & Politique*, 49(2), 15, pages 11 à 21. doi:10.3917/ecopo.049.0011

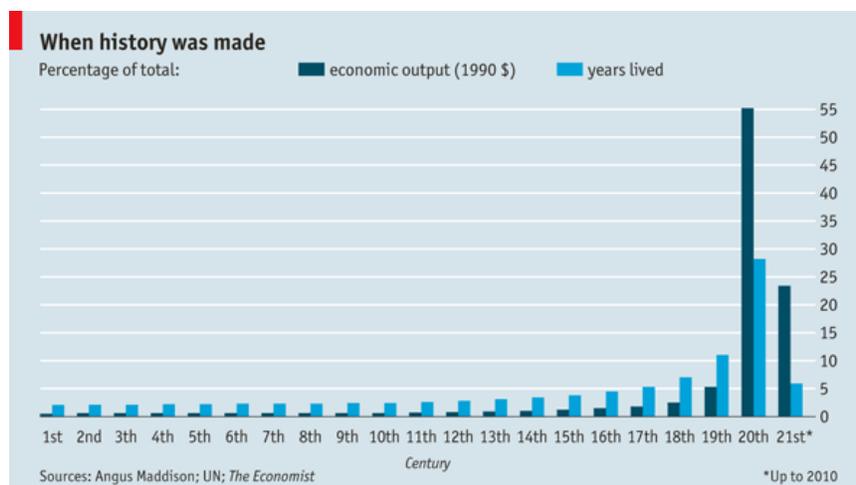


Figure 32. Un millénaire de croissance mondiale

Source : Cukier, 2012²¹⁷

Dès l'aube de la révolution industrielle, son expansion rapide et continue façonne un nouveau visage à l'activité économique. On passe d'une économie agraire et artisanale dont la ressource énergétique première réside dans le travail humain et animal, à une société industrielle et commerciale soutenue par des machines beaucoup plus productives.

²¹⁷ Cukier, K. (2012). *More 2,000 years in a single graphic*. Economist.com. Consulté 4 août 2017, à l'adresse <http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2012/06/mis-charting-economic-history>

Figure 33. Evolution des proportions des ressources énergétiques utilisées durant les deux derniers siècles, entre 1860 et 2000

Source : Ritchie & Roser, 2017²¹⁸

Ainsi, après avoir connu un régime stationnaire (Figure 34), la production par tête des pays qui détenaient ces moyens de production a été multipliée par 15 en moyenne au cours des deux derniers siècles (Michel, 2007: 289). Après la Seconde Guerre mondiale, la mobilisation de l'énergie « explose » véritablement, passant de 2 Gtep en 1945 à 11 Gtep en 2008 (Favenec, J., 2009)²¹⁹ : « De 1945 à 1975, les « Trente glorieuses » ont été une période de croissance accélérée et aussi de consommation inédite d'hydrocarbures », affirme Gaël Giraud, cité par M. Auzanneau (2014)²²⁰.

²¹⁸ Ritchie, H., & Roser, M. (2017). *Energy Production & Changing Energy Sources*. Our World In Data. Consulté 4 août 2017, à l'adresse <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources/>

²¹⁹ Favenec, J. (2009). *Géopolitique de l'énergie* (p. 49, 304 pages). Paris: Editions Technip.

²²⁰ Auzanneau, M. (2014). Gaël Giraud, du CNRS : « *Le vrai rôle de l'énergie va obliger les économistes à changer de dogme* ». Oil Man. Consulté le 4 août 2017, à l'adresse :

En deux siècles donc, l'énergie fossile deviendra la formidable force motrice (Nikiforuk, 2015)²²¹ de l'économie alimentée par des machines capables de prendre le relais de nos bras et jambes au moyen desquels notre travail était principalement effectué (Figure 35), avec une « efficacité bien supérieure et sans cesse croissante » (Jancovici, J., 2015 : 15). En effet, le pouvoir calorifique des énergies fossiles est considérable.²²² Un humain a une puissance de 100 W s'il travaille 24h sur 24, 365 jours par année. Il fournit donc un travail équivalent à $100 \times 24 \times 265 = 876$ kWh par an. Un Canadien moderne consomme en moyenne l'équivalent de 325,5 Giga Joules par an soit plus que 90 000 kWh par an (Statistique Canada, 2016)²²³. Un Canadien moderne a donc à sa portée plus de 100 « esclaves énergétiques » à son service (Nikiforuk, A., 2015).

Ainsi, dans des conditions d'abondance et de grande concentration, « cela coute mille à cent mille fois moins cher d'utiliser un moteur que de recourir à du travail humain payé avec des salaires occidentaux » (Jancovici, 2013 : 17). Dit autrement, « il coutait moins cher d'avoir des machines alimentées par des carburants fossiles pour faire le travail exécuté depuis des millénaires par les muscles humains et animaux alimentés, eux, par l'énergie solaire sous forme d'aliments » (Greer, 2013, page 149). Grâce à l'énergie fossile, les prix réels – représentant le temps qu'il faut travailler pour se payer la chose concernée – ont diminué (Jancovici, 2013), ce qui a fait augmenter le pouvoir d'achat et la demande. Symétriquement,

<http://petrole.blog.lemonde.fr/2014/04/19/gael-giraud-du-cnrs-le-vrai-role-de-lenergie-va-obli-ger-les-economistes-a-changer-de-dogme/>.

²²¹ Nikiforuk, A. (2017). *L'énergie des esclaves* (240 pages). Montréal: Ecosociété.

²²² Il est important pour Jancovici d'avoir une mesure physique des flux pour laquelle la donnée en énergie est la meilleure unité de mesure et permet de nous interpeller sur l'importance de la main d'œuvre humaine qu'il faut mobiliser pour avoir le flux en question (Jancovici, J., 2015).

²²³ Statistique Canada. (2016). *Énergie*. *Statcan.gc.ca*. Consulté le 4 août 2017, depuis <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-402-x/2012000/chap/ener/ener-fra.html>

la mécanisation, l'augmentation de la productivité²²⁴ et la diffusion des techniques ont eu pour conséquence l'accroissement de la quantité de biens et services destinés à la vente. L'abondance et le caractère bon marché, voire « quasi gratuit » (Jancovici, 2015; 46) de ces énergies concentrées en ont fait de véritables « ressources clefs » qui ont rendu possible l'existence de l'économie de croissance » (Greer, 2013; 119). Comme le résume J. Rifkin, l'énergie fossile a permis de bâtir « une civilisation entière sur les dépôts exhumés du carbonifère » (2011; 27), dont le PIB occidental croissant n'est autre que la mesure de son expansion (Jancovici, 2015).

« [...] sur le long terme, une relation extrêmement stable existe entre la consommation d'énergie et la croissance du PIB. On retrouve la même très grande stabilité lorsque l'on élargit la perspective non plus dans le temps, mais dans l'espace » (Auzanneau, 2014).

D'abord, pour chaque pays donné, on constate qu'il y aurait une relation linéaire entre la quantité d'énergie consommée pour créer de la richesse monétaire (présentée comme la consommation d'énergie commerciale dans la figure ci-dessous) par habitant, et leur revenu :

²²⁴La productivité est définie par les économistes comme « productivité de main d'œuvre, soit la valeur créée par unité de travail » (David A. Moss, *A Concise Guide to Macroeconomics*, cité dans Greer, 2013, page 46).

Grâce au faible coût de l'énergie, la productivité augmente (Jancovici, J., 2013). En fait, tout ce qui contribue à faire décroître le nombre d'heures travaillées par les employés pour « produire une quantité de biens et de services contribue à la hausse de la productivité » (Greer, J., 2013 : 46). Ainsi, si l'on doit sortir des énergies fossiles et revenir à une économie centrée sur le travail mécanique humain dont la productivité est bien en deçà de celle des machines, la productivité diminuera et ce sera la fin de la croissance économique.

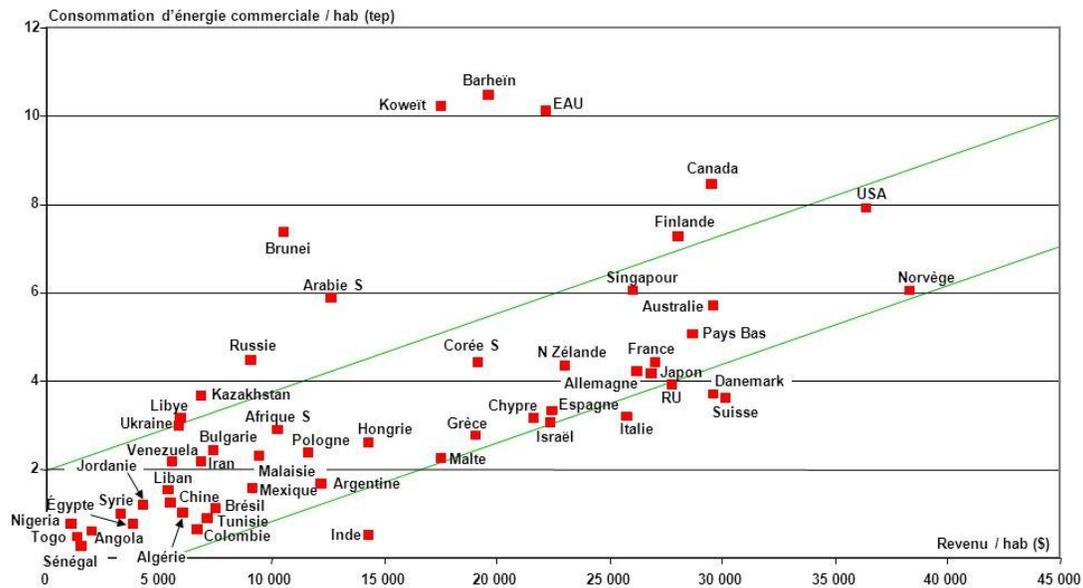


Figure 34. Consommation d'énergie et revenu 2004 dans le monde

Source : Favennec, 2009 : 34²²⁵

Mais d'après Giraud, il y a plus de sens à analyser cette corrélation à l'échelle mondiale car, pour un pays donné, « l'externalisation de la consommation d'énergie par le biais des importations » (cité par Auzanneau, 2014) peut sous-évaluer le soutien de l'énergie à l'économie. Ainsi, si on élargit la perspective à l'échelle mondiale, on voit, d'après la Figure 37 que, depuis 1965, la croissance économique et l'approvisionnement énergétique TPES mondial suivent la même évolution et sont globalement (mis à part durant la crise économique de 2009) en hausse. On remarque également qu'elles suivent les mêmes fluctuations dans le sens où la stagnation de l'une des courbes entraîne la stagnation de l'autre, comme c'est le cas entre 1979 et 1984 par exemple, avec une ou deux années de décalage. Malgré ces similitudes, on voit un découplage net entre la croissance économique, d'aspect exponentiel, qui croît de 7,4% par année en moyenne et la croissance de la consommation

²²⁵ Favennec, J. (2009). *Géopolitique de l'énergie* (p. 49, 304 pages). Paris: Editions Technip.

énergétique, moins forte, s'élevant à 1,5%/an en moyenne²²⁶. En termes de quantité, les données montrent qu'en l'espace de 50 ans, le PIB mondial a été multiplié par 50 environ tandis que le TPES mondial a été multiplié par 3,5, soit 14 fois moins.

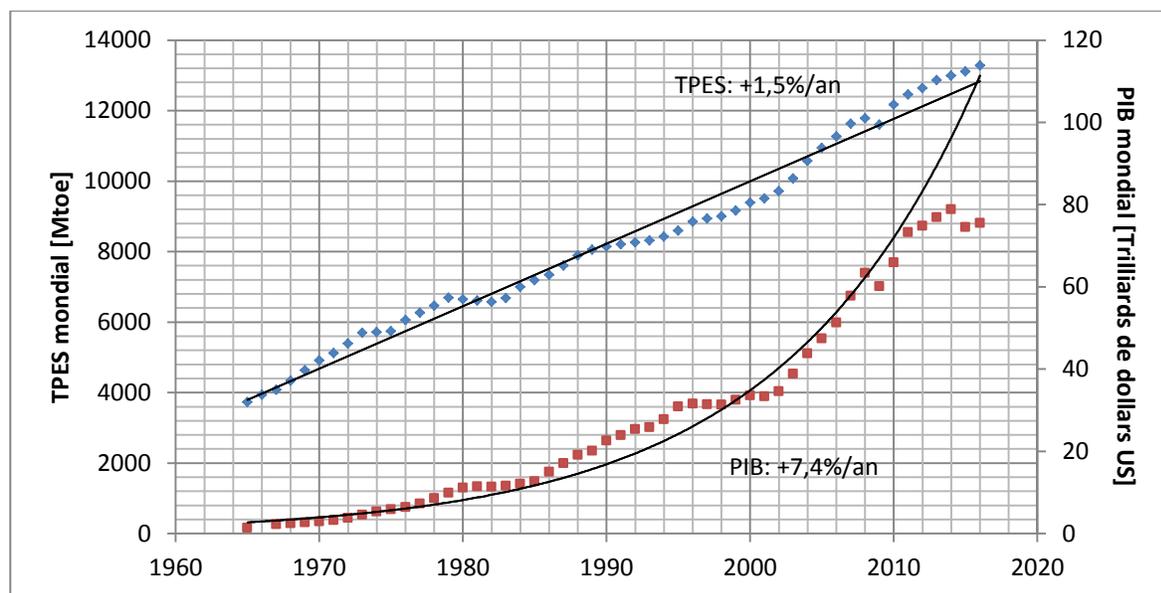


Figure 35. Consommation d'énergie et PIB mondiale de 1965 à 2016

Source: BP statistical review 2017 et World Data Bank²²⁷

En termes de quantité mobilisée, la régression linéaire²²⁸ à la courbe du PIB mondial en fonction de la consommation d'énergie montre que l'évolution de la corrélation du

²²⁶ Application de la formule statistique $\text{taux de croissance} = \left(\frac{\text{valeur présent}}{\text{valeur passée}} \right)^{\frac{1}{\text{nombre d'années}}} - 1$

²²⁷ Courbes créées à partir des données TPES extraites de BP statistical review 2017 (BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy June 2017* (p. "Primary Energy Consumption"). Excel. Consulté à l'adresse <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>) et des données PIB extraites de World Data Bank (World Data Bank. (2017). *Indicateurs du développement dans le monde* | DataBank. Consulté à l'adresse <http://databank.banquemondiale.org/data/reports.aspx?source=indicateurs-du-d%C3%A9veloppement-dans-le-monde&preview=on>)

PIB/quantité d'énergie consommée est presque constante (Giraud cité par Auzanneau, M., 2014).

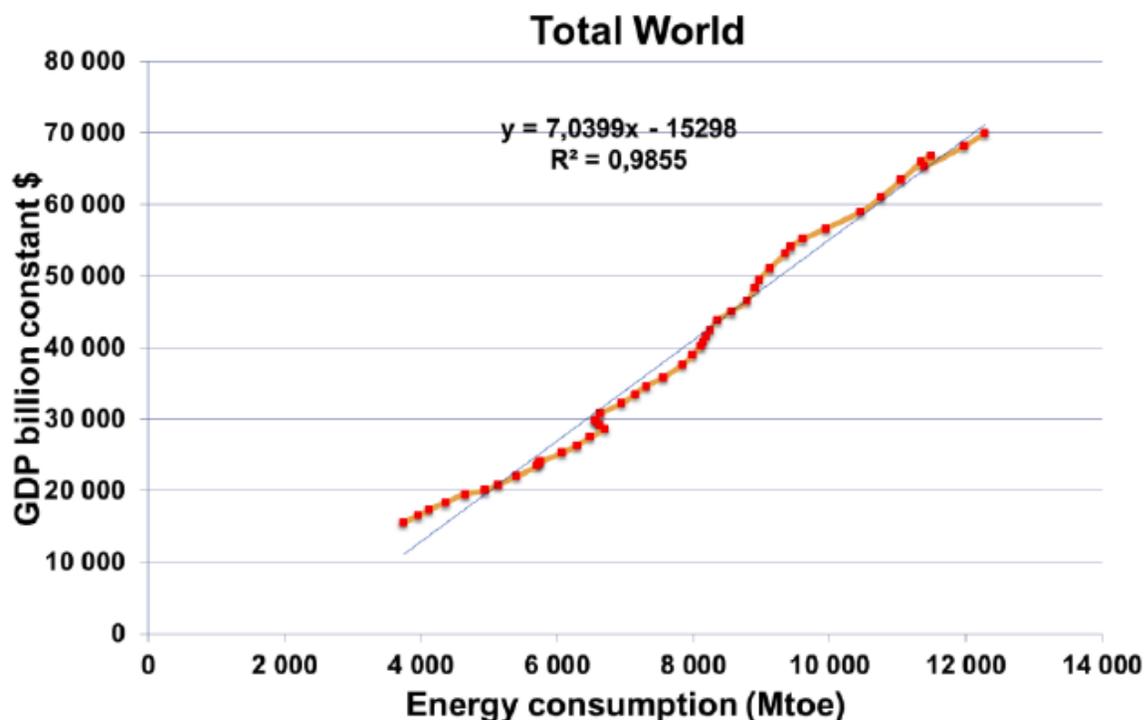


Figure 36. PIB [milliards de dollars] par rapport à la consommation d'énergie [Mtoe]

Source : Giraud, Jancovici & Zeynep, 2013²²⁹

Comme ce qu'on avait commencé à remarquer dans la figure ci-dessus, si on regarde maintenant l'évolution de la croissance annuelle, on constate la même fluctuation entre le taux

²²⁸ La droite qui suit la courbe en rouge est une droite de régression linéaire permettant d'estimer l'équation de la relation existant entre les variables X (la consommation d'énergie) et Y (le PIB) (Depiereux, E., *Régression et coefficient de détermination*. FUNDP. Consulté à l'adresse

<http://webapps.fundp.ac.be/biostats/biostat/modules/module20/page5.html>)

²²⁹ Giraud, G., Jancovici, J., & Zeynep, K. (2013). *Lien PIB/consommation d'énergie*. The Shift Project. Consulté à l'adresse <http://www.theshiftproject.org/fr/cette-page/lien-pibconsommation-denergie>

de croissance de la quantité d'énergie consommée dans le monde et le taux de croissance du PIB annuel mondial par rapport à l'année précédente :

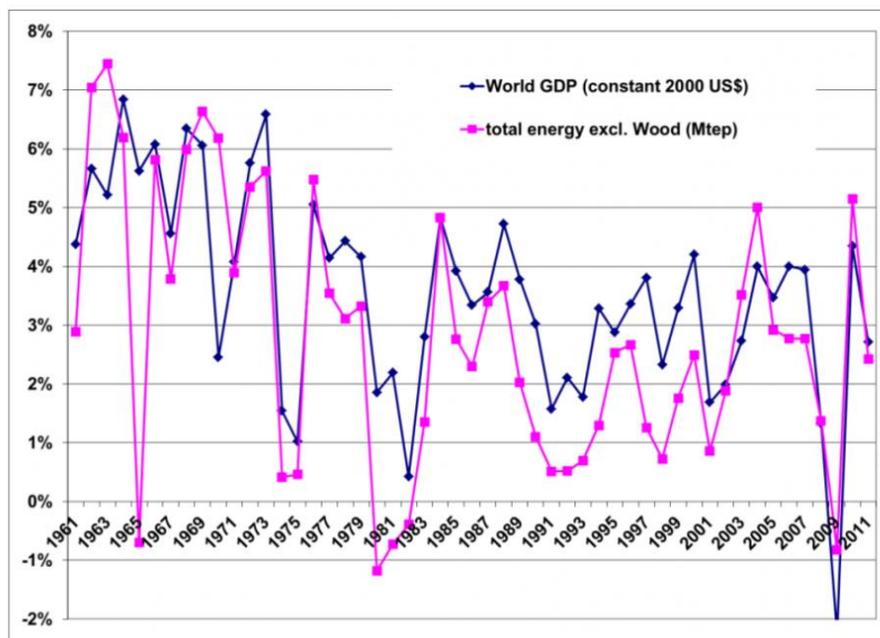


Figure 37. Graphique présentant les courbes de consommation de l'énergie et d'évolution du PIB depuis le début des années 1960

Source: Giraud, Jancovici & Zeynep, 2013²³⁰

Le graphique ci-dessus nous montre que depuis 1973 (suite au premier choc pétrolier), l'évolution de la croissance économique, énergétique, et de la consommation pétrolière est étroitement liée.

De ces constats, on peut établir quelques interprétations.

²³⁰ Giraud, G., Jancovici, J., & Zeynep, K. (2013). *Lien PIB/consommation d'énergie*. The Shift Project. Consulté à l'adresse <http://www.theshiftproject.org/fr/cette-page/lien-pibconsommation-denergie>)

D'après Jancovici, « 100% du PIB occidental est peu ou prou asservi à l'approvisionnement énergétique moderne » (2013; 63)²³¹, qui, si on le réduit au PIB par personne, « varie très exactement, avec une ou deux années de décalage, avec la production mondiale de pétrole en volume, depuis 1980 » (Jancovici, 2015 : 24). Si on suit ce raisonnement, sans croissance de la consommation d'énergie, il n'y a pas de croissance économique. Comme la variation du PIB suit celle de l'énergie, on pourrait établir l'hypothèse que PIB et énergie entretiennent une relation de cause à effet univoque de la consommation d'énergie vers le PIB et non l'inverse (Auzanneau, 2014). Or, si on analyse cette corrélation en termes de coût monétaire, celle-ci est amoindrie. Elle se révèle être de l'ordre de 10%, « représentant le coût de la facture énergétique dans la production » (Auzanneau, 2014). Mais pour certains économistes, tels que Giraud, la relation serait plus élastique, c'est-à-dire que les deux facteurs varient sensiblement de la même façon, et le facteur de proportionnalité serait beaucoup plus grand que 10%, plutôt de 60% au moins :

« Autrement dit, si la consommation d'énergie augmente de 10%, la théorie économique conventionnelle prédit que la hausse induite du PIB par habitant se limitera à moins de 10%. D'après Gaël Giraud, l'observation empirique montre que l'augmentation est en réalité de 60%, pas moins » (Auzanneau, 2014).

Et cette différence s'explique par des prix d'hydrocarbures bas qui ne révèlent en rien un « équilibre naturel » du marché, mais plutôt des stratégies spéculatives ou des manipulations de prix inhérentes à des tensions géopolitiques (Auzanneau, 2014).

Nous avons vu que le flux d'énergie fossile a donc non seulement permis l'existence de la nouvelle économie, mais qu'il l'alimente constamment, avec un rapport au PIB proche de 1. Les données énergétiques des années précédentes nous apprennent qu'en effet l'apport

²³¹ Jancovici, J. (2013). *Transition énergétique pour tous* (p. 63, 240 pages). Odile Jacob.

énergétique n'a cessé d'augmenter, en lien avec la croissance du PIB. On ne peut donc faire croître notre économie sans mobiliser toujours plus d'énergie.

Passer d'une démographie de 7,5 milliards d'individus en 2017 à 9 milliards en 2050 (avec une croissance démographique de 30% en 40 ans) va accroître la consommation énergétique individuelle. Par ailleurs, cet accroissement de 30% en 40 ans se fera principalement dans les pays dits « en voie de développement » où le potentiel futur de consommation de l'énergie est considérable : aux E-U, un habitant consomme 8 Tep/an. En Indonésie, il en consomme dix fois moins.

Cependant, comme nous l'avons décrit au chapitre 1, le capital naturel fossile n'est pas renouvelable à l'échelle de temps de l'humanité et compte tenu de sa grande responsabilité dans le RC, nous devrions nous en séparer. Mais après avoir montré le lien étroit entre la croissance économique et la quantité d'énergie mobilisée, on en arrive à l'idée qu'une baisse de la quantité d'énergie mobilisée devrait entraîner une baisse de la croissance et donc une baisse de notre niveau de vie matérielle.

C'est là qu'intervient une première solution : l'efficacité énergétique, c'est-à-dire la possibilité de produire plus avec la même quantité d'énergie ou de produire autant avec moins d'énergie. En effet, la relation PIB/Énergie peut être mise en évidence par l'équation suivante, établie par Giraud et Jancovici (Sapy, 2013) :

$$\text{PIB} / \text{Hab} = \text{PIB} / \text{Tep} \times \text{Tep} / \text{Hab}$$

Où PIB / Tep représente l'intensité énergétique ou productivité énergétique. Elle rend compte de la quantité d'énergie utilisée pour créer de la valeur économique. C'est une mesure de la recherche de l'efficacité énergétique dans le sens où on veut créer le plus de valeur

économique possible avec le moins d'énergie mobilisée possible. Plus il y a aura d'efficacité énergétique, plus ce facteur sera grand.

Tep / Hab. étant l'énergie mobilisée par habitant, cette équation signifie alors que :

$\text{Richesse par habitant} = \text{Consommation d'énergie par habitant} \times \text{Intensité énergétique}$

Ainsi, la réduction de la consommation par habitant entraînerait une baisse nette de la consommation d'énergie ce qui risque d'impliquer un ralentissement ou un arrêt de la croissance économique si elle n'est pas couplée à la recherche de l'efficacité énergétique. L'objectif est donc d'augmenter la productivité de l'énergie, soit d'augmenter la valeur créée avec un minimum d'énergie requis. L'efficacité énergétique est-elle le moyen d'accomplir la transition énergétique.

2.2.3 Conclusion

Sur le plan empirique, on constate que

1) L'observation du passé nous montre une corrélation étroite entre la consommation énergétique et la croissance économique. Le flux d'énergie fossile a non seulement permis l'existence de la nouvelle économie, mais qu'il l'alimente constamment, avec un rapport au PIB proche de 1. Les données énergétiques des années précédentes nous apprennent qu'en effet l'apport énergétique n'a cessé d'augmenter, en lien avec la croissance du PIB. On ne peut donc faire croître notre économie sans mobiliser toujours plus d'énergie. **Ainsi, on observe sur le plan empirique que ni la dématérialisation ni les gains de productivité n'ont pu compenser les *throughput* :**

«During the last 135 years, resource use only declined during periods of recession or severe economic crisis. Absolute dematerialization has not been achieved in spite of massive efficiency gains in many industrial processes and in the end uses of material and energy [...] All resource savings have been offset by rising demand induced by declining prices and growing income [...] Also, a shift from products toward services in the economy in the last decades has only contributed to relative dematerialization, while overall material and energy use continued to grow» (Gierlinger & Krausmann, 2011 : 372).

2) Par ailleurs, face à la globalisation, ces penseurs mettent l'accent sur la non-validité de notre mesure de la richesse à l'échelle nationale. Le PIB est généralement mesuré pour un état-nation. **L'économie de cet état-nation peut être tertiarisée, mais la consommation des ménages portent sur des biens matériels produits de plus en plus souvent dans un autre état-nation.** Ces raisonnements devraient peut-être être tenus à l'échelle de l'économie mondiale, puisque nos économies sont mondialisées. Pour eux, envisager ces questions à l'échelle d'une économie nationale n'a pas de sens. Il faut donc considérer le PIB mondial pour éviter ce biais qui peut faire croire à une dématérialisation, là où il n'y en aurait pas.

Ainsi, la soi-disante dématérialisation qui rendrait possible une création de valeur exponentielle de l'économie sans apport énergétique supplémentaire – vue au chapitre 1 – est remise en question dans ce chapitre 2. Il nous apparaissait d'abord logique de questionner cette possible création de valeur exponentielle à un bien ou un service sans un apport de *throughput* supplémentaire. En effet, jusqu'à combien un consommateur serait prêt à payer pour son massage de 30 minutes avec une huile de massage proposé par la coiffeuse? Peut-elle créer de la valeur infinie sur une durée de 30 minutes, avec un seul pot d'huile? Jusqu'à combien un consommateur est prêt à payer pour acheter un iPhone? Est-ce qu'un prix totalement déconnecté (bien qu'il le soit déjà) de son cout de production peut-il croître de manière exponentielle? D'autre part, ces observations pourraient remettre ne cause le fait que les biens immatériels tels que la connaissance ne se déprécient pas. Enfin, il n'y aurait donc rien d'immatériel aux actions marketing car elles reposent sur une quantité de travail. Il n'y aurait

non plus rien d'immatériel aux services car la tertiarisation n'existe que sur la base d'une activité industrielle. L'un ne remplace pas l'autre (à l'échelle mondiale). Ils se complètent.

Nous avons vu que la croissance économique est limitée par un apport en énergies non renouvelables qui, par définition, s'épuisent, et que le progrès technique (exprimé ici en termes de gains de productivité et de dématérialisation) ne permet que très partiellement de compenser ce capital naturel, voire même qu'il tendrait à l'épuiser d'avantage. Sur un horizon long-terme, l'état de dégradation naturel de la terre nous amène inexorablement vers moins de richesse, et donc vers une décroissance.

Mais, sur un horizon plus court, de l'ordre de 50-60 ans, serait-il possible de substituer ces ressources non renouvelables par des ressources renouvelables et ainsi affranchir la croissance économique de ces limites ?

2.3 Limites des énergies renouvelables

Le fait est que « toute la technologie moderne est conçue en fonction d'énergie très concentrée et que la survie de 7 milliards de personnes dépend du fonctionnement ininterrompu des infrastructures techniques existantes » (Greer, 2013 : 142).

2.3.1 Introduction

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que l'efficacité énergétique a ses limites. Il faudra toujours de l'énergie pour produire et faire fonctionner n'importe quelle machine, aussi efficace soit-elle, et nous ne pouvons créer cette énergie. Par ailleurs, la dynamique économique de nos sociétés tend à réduire à néant les économies d'énergie que le progrès

technique permet d'obtenir en principe. Cette dynamique en effet nous incite à mettre à profit ces gains pour produire et consommer davantage. Ce sont les effets rebond.

Ainsi, afin de ralentir la dégradation du stock en capital naturel, on peut parier sur un autre apport énergétique, celui des ressources renouvelables. Même si à long terme, il n'y a pas d'énergies renouvelables éternellement, ces ressources ont l'avantage de présenter un flux énergétique important : le rayonnement solaire. « La Terre reçoit 180 000 milliards de kW (180 000 milliards de kJ/seconde) » (Frédéric, 1984 : 221). Sachant que la production énergétique annuelle mondiale est de 500 EJ (476 EJ précisément), ce qui signifie, 16 milliards de kJ/s, cet apport naturel s'avère être 10 000 fois plus « qu'il n'en faut pour couvrir tous nos besoins énergétiques » (Frédéric, 1984 : 221). Il y a aussi la géothermie, que l'on peut penser comme un flux, mais qui reste très marginale par rapport aux radiations solaires (chapitre 1). Concernant les énergies alternatives liées au transport telles que les biocarburants, l'*Energy Policy Act* des États-Unis établit que l'offre additionnelle en éthanol sera de 890 000 bpj contre 930 000 bpj de demande supplémentaire en essence, ce qui n'en laisse pas assez, dans un contexte de croissance économique, pour répondre à la demande. Mais ces énergies renouvelables, peuvent-elles vraiment rendre les mêmes services, aux mêmes coûts, que les énergies non renouvelables? C'est toute la question de cette seconde partie de notre chapitre 2.

Afin de savoir si oui ou non les énergies renouvelables peuvent répondre aux mêmes services et aux mêmes couts que les fossiles, nous commencerons notre étude par l'analyse de certaines caractéristiques physiques des ER que nous jugeons essentiels de comparer aux EF. Ces caractéristiques sont leur densité, leur intermittence et leurs moyens de stockage.

En deuxième partie, nous établirons ce que ces caractéristiques impliquent en termes de rendements et de cout énergétique pour répondre aux mêmes services.

2.3.2 La densité énergétique des énergies renouvelables inférieure à celles des fossiles

La densité énergétique (appelé aussi concentration) d'une énergie est la quantité d'énergie que fournit un volume donné. D'après Greer, en voulant remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables, « nous faisons face à un manque de concentration plutôt qu'à un manque d'énergie » (2013 : 142). Greer explique ce constat par le fait que « **l'énergie solaire qui atteint la Terre est diffuse** » (2013 : 132) et que « plus la concentration d'une ressource à son état naturel est faible, plus la quantité d'énergie mobilisée pour l'extraire et la transformer en une forme utilisable est grande » (Greer, 2013 : 121) :

« Pour fabriquer et entretenir un panneau solaire, une grosse éolienne, ou une usine d'éthanol, il faut **utiliser énormément d'énergie concentrée** pour extraire et raffiner les matériaux, mettre en jeu des procédés de fabrication complexes et expédier le tout à des centaines ou des milliers de kilomètres » (Greer, 2013 : 138).

Les ressources d'énergie alternatives (énergie hydroélectrique, énergie solaire, éolienne, bioénergie, géothermique, des océans) et les technologies de stockage sont multiples mais ont des **densités énergétiques** beaucoup plus faibles que celles des EF, c'est-à-dire que pour une même masse, la quantité d'énergie que pourra fournir une éolienne tout au long de sa durée de vie sera bien inférieure à celle contenue dans une même masse de charbon par exemple. **La conséquence d'une faible densité énergétique est qu'une plus grande quantité de ressources et matériaux sont nécessaires pour fournir la même quantité d'énergie fournit par un matériau dense ou d'une énergie fossile.**

Même si l'éolien et les panneaux solaires se fournissent avec l'énergie du vent et du soleil, ce qui est un apport énergétique abondant, non polluant et illimité, on ne réduit pas l'apport énergétique, la fabrication de ces technologies nécessitant un **volume de ressources** non

renouvelables composé d'énergie fossiles et de métaux. Par exemple, le panneau solaire photovoltaïque nécessite du gallium et parfois de l'indium, minerais non renouvelables qui en plus est extrait au moyen de machinerie lourde fonctionnant seulement à l'énergie fossile. L'acier et l'aluminium nécessaires pour produire les centrales éoliennes sont fabriqués à partir du charbon. Ou encore, le béton utilisé pour construire les centrales ou les routes pour aller extraire les matériaux est créé à partir de fossile. Ce qui montre qu'aujourd'hui, aucun processus d'énergie alternative ne peut se reproduire sans un flux de combustibles fossiles (Fridley cité par Heinberg, 2010 : 236). Par ailleurs, les déchets de minerai utilisé pour la plupart des technologies ER sont très toxiques mais finissent quand même par être enfouis sous terre car il est souvent « trop coûteux de les recycler » (Zehner, 2012, 18 :437).

Une autre conséquence de la différence de concentration implique que pour pouvoir répondre à la demande en énergie actuelle demande un **espace beaucoup plus important**. Combien de panneaux solaires pour fournir la même quantité d'énergie qu'une centrale à charbon de 1000 MW? Une centrale électrique de charbon de capacité de 1000 MW demande 1 à 4 km² de terrain, sans compter la superficie pour extraire et transporter le charbon. 20 à 50 km² de superficie serait nécessaire pour générer la même quantité d'énergie depuis un panneau solaire (Fridley cité dans Heinberg R. & D. Lerch, 2010, traduction libre).

Ainsi, le discours portant sur les énergies renouvelables qui fait croire que celles-ci peuvent remplacer les énergies fossiles, source d'énergie résultant de millions d'années d'énergie solaire amassée, est, selon Greer, une « grande confusion » (2013). On commence à entrevoir ainsi que « la transition de l'économie industrielle actuelle vers les économies de l'avenir ne se fera pas en débranchant les carburants fossiles et en branchant une autre source d'énergie pour les remplacer » (Greer, 143). Compte tenu des paramètres physiques qui diffèrent nettement entre une énergie concentrée et une énergie diffuse, pourra-t-on encore jouir d'un tel confort qui demande un approvisionnement ininterrompu en énergie, et une transition rapide?

2.3.3 Des énergies difficilement contrôlables

2.3.3.1 Intermittence et stockage

Contrairement aux centrales à charbon, au nucléaire, au gaz et aux stations hydroélectriques qui fournissent un flux constant d'énergie que les opérateurs commandent pour correspondre à la quantité d'énergie demandée (Zehner, O., 2012)²³², le solaire et l'éolienne sont des énergies naturelles **intermittentes**. L'énergie du soleil ou du vent peut être exploitée seulement lorsque le soleil brille ou lorsqu'il vente. Celle du vent est particulièrement difficile à prédire (Zehner, 2012). On peut prédire sur une année mais pas sur un temps très court, car on peut manquer de vent partout en Europe en même temps, avec du vent proche de zéro pendant dix jours. L'énergie éolienne n'est pas adaptée pour approvisionner une énergie de base, c'est-à-dire une énergie répondant à la demande minimale jour et nuit. Si les opérateurs s'appuyaient sur l'énergie éolienne comme « base-load », tous les services essentiels tels que les hôpitaux seraient coupés à la moindre coupure de vent. Quant aux radiations solaires, celles-ci sont plus prévisibles en fréquence mais pas en intensité (Zehner, O., 2012). L'intermittence se traduit par un **facteur de capacité**, c'est-à-dire son taux de fonctionnement qu'elle peut fournir sur une année²³³. Alors que les centrales fossiles ou nucléaires fonctionnent généralement à 80 % ou 90 % de leur capacité, ce chiffre est de l'ordre de 12 à 19% pour les panneaux

²³² Zehner, O. (2012). *Green illusions*. Lincoln: University of Nebraska Press.

²³³ Le facteur de capacité ou « facteur de charge d'une unité de production électrique est le ratio entre l'énergie qu'elle produit sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné » 24h/24, 7jours/7 (Fondation D'entreprise Alcen Pour La Connaissance Des Énergies. (2017). *Qu'est-ce que le facteur de charge d'une unité de production électrique* . *Connaissance des Énergies*. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-le-facteur-de-charge-d-une-unite-de-production-electrique-120305>

photovoltaïques, 5 à 8 fois plus faible qu'une centrale à charbon thermique (70 – 90%), et environ 24% pour les éoliennes (Zehner, O., 2012).

Combien de centrales éoliennes pour remplacer une centrale à charbon?

Pour avoir l'équivalent en production d'une centrale à charbon de puissance installée²³⁴ de 1000MW avec un facteur de capacité de 75%, il faudra une centrale éolienne d'une puissance installée trois fois plus grande, soit 3000 MW, avec une capacité de 24%. Il faudra ainsi installer 600 centrales éoliennes d'une capacité de 5MW pour fournir la même offre. Si on prend l'exemple de la France, d'après les données d'EDF, les centrales à charbon françaises ont des puissances oscillant entre 120 et 700MW (EDF, 2017)²³⁵, avec un facteur de capacité de 85% en moyenne fournit entre 893 et 5200²³⁶ GWh d'électricité sur une année. Ainsi, pour une centrale éolienne de puissance égale à 5 MW²³⁷, avec un facteur de capacité de 35%, fournit 15 GWh d'électricité par année. Ainsi, il faudrait entre 60 et 350 éoliennes pour remplacer une centrale à charbon²³⁸. Mais ce calcul est biaisé dans le sens où l'énergie éolienne est intermittente. S'il n'y a pas de vent pour une centrale éolienne, il n'y a pas pour les 350 autres. Ainsi, c'est l'énergie réellement produite qui est importante. Celle-ci est mesurée par le taux de capacité ou facteur de capacité :

²³⁴ La puissance nominale ou « puissance installée » est la puissance maximale d'une centrale. « Le rendement maximal produit par générateur d'électricité dans certaines conditions. Par exemple, le taux de capacité d'une seule éolienne peut s'élever à 1 500 kilowatts (1,5 mégawatt), mais uniquement dans des conditions de vents très forts » (Morris, Penht, 2015, 351 :357)

²³⁵ EDF, *Le thermique à flamme en chiffres*. (2017). EDF France. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-thermique-a-flamme-en-chiffres>

²³⁶ Facteur de capacité×24heures×365jours×puissance installée

²³⁷ 750 éoliennes = 1 réacteur nucléaire | *Ethicologique*. (2017). Ethicologique.org. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <http://ethicologique.org/index.php/750-eoliennes-1-reacteur-nucleaire/>

²³⁸

« Une turbine éolienne d'une capacité nominale de 1,5 mégawatts par exemple peut, théoriquement, dans des conditions idéales, produire jusqu'à 36 mégawatheures par jour (1,5 M x 24 h), soit l'équivalent d'un taux de capacité de 100 pour cent - la turbine est à son plein rendement tout le temps. En pratique, le taux de capacité d'une éolienne terrestre bien située est plus proche de 25 pour cent, une éolienne de 1,5 MW tournerait donc en moyenne à 0,375 mégawatt, et produirait 9 mégawatheures par jour. En Allemagne, le taux de capacité des éoliennes terrestres est inférieur à 20 pour cent, alors que celui des éoliennes en mer est dans les 30 pour cent. Le taux de capacité du solaire dépendant en grande partie de l'ensoleillement est en général estimé entre 10 et 20 pour cent » (Morris G. & Pehnt M., 2015 : 351-352).

2.3.3.2 Comment gérer la production excédentaire?

L'approvisionnement sur le réseau ne peut excéder plus de 5% de la demande car il faut garantir l'équilibre du réseau en faisant correspondre l'offre à la demande à + / - 5 %, car si la quantité fournie est supérieure ou inférieure il y a des risques tels que les risques d'endommagement des appareils. Lorsque le vent souffle ou que les radiations solaires sont intenses, l'électricité produite en excès ne peut être acheminée sur le réseau. Afin de gérer les excédents ou combler le manque dans l'approvisionnement d'électricité, les fournisseurs d'énergie a) utilisent un réseau smart-grid²³⁹, comme à Hawaï et en Californie pour transporter l'électricité entre des zones déficitaires et excédentaires en énergie. Cependant « l'ingénieur le plus optimiste ne pourra jamais attendre de ce réseau intelligent de prendre en charge plus de

²³⁹ « Les réseaux intelligents ou « smart grids » sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies informatiques, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs. » (<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>) (Fondation D'entreprise Alcen Pour La Connaissance Des Énergies. (2017). *Réseau intelligent (Smart Grid)*. Connaissance des Énergies. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>)

30% de l'énergie éolienne instantanée » (Zehner, 2012 :46). b) vendent l'énergie de surplus dans les pays avoisinants (L'Allemagne exporte dans les pays voisins, en Norvège, Suède) c) délestent l'énergie excédentaire dans la nature (perte) d) stockent leur énergie. Or, contrairement aux énergies fossiles, l'énergie renouvelable n'est pas stockable. Pour cela, on utilise le stockage cinétique, gravitationnel, inertiel, chimique.

a) Le stockage chimique consiste à utiliser le principe de la batterie. La principale alternative pour remplacer l'essence utilisée pour les voitures est la batterie électrique. Ces batteries ont des densités énergétiques bien inférieures à l'essence elle-même, c'est-à-dire que pour une même masse, la quantité d'énergie contenue dans une batterie sera bien inférieure à celle contenue dans de l'essence. Par exemple, une batterie d'ion-lithium contient 0,5MJ/kg de batterie tandis que l'essence en contient 46MJ/kg. Bien que beaucoup de recherche se portent sur l'amélioration des batteries, toutes butent sur la limite théorique de la densité de batterie, c'est-à-dire 3MJ/Kg (Heinberg R., & Lerch D., 2010). Pour la voiture électrique Tesla par exemple, une batterie ion-lithium pèse environ 400 kg et contient 190 MJ d'énergie. À titre de comparaison 38 litres d'essence pesant à peu près 28 kg, soit 14 fois moins lourds contiennent 1200MJ, soit 6 fois plus d'énergie. Avec des batteries en lithium, la quantité de batterie pour rendre un système indépendant est colossale et constitue un réel problème pour le déploiement à grande échelle (Heinberg & Lerch, 2010). Par ailleurs, la batterie présente beaucoup de pertes lors de la conversion, et son nombre de cycles charge-décharge ainsi que sa chimie limite son espérance de vie. À cela s'ajoute la problématique de la disposition de la batterie en fin de vie.

b) Un autre stockage chimique est celui du stockage à hydrogène : ce principe consiste à transformer l'électricité des panneaux solaires, centrales éoliennes et hydrauliques en hydrogène par électrolyse de l'eau (Clément, 2013)²⁴⁰. L'électrolyse crée du dihydrogène

²⁴⁰ Clément, N. CNRS - *Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie*. *Cnrs.fr*. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2013/bulles.htm>

H₂ grâce à des molécules d'eau H₂O qui se séparent en H₂ et O₂ par le passage d'électron (électricité) grâce à un électrolyseur. Lors de l'utilisation, l'hydrogène, stocké dans une pile à combustible, est convertie en électricité de nouveau. L'avantage est que l'électrolyse a pour vecteur de stockage l'eau qui est non polluant et produit de l'oxygène. Il existe aussi la technique de la photolyse qui sépare les molécules d'hydrogène et d'oxygène en utilisant le rayonnement solaire (Frédéric, 1984). Le grand défi de cette technique réside dans les grandes pertes lors de la conversion (rendement de 65% (Frédéric, 1984 : 410), et l'important volume de stockage que cette technique requiert dû à sa faible densité : « il faut 50 kg de bouteilles en acier pour stocker et véhiculer 10 m³ d'hydrogène » (Frédéric, 1984 : 411). Par ailleurs, on « fabrique » de l'hydrogène car celui-ci est un vecteur énergétique qui n'existe pas de manière naturelle (Planètes Energies, 2015)²⁴¹ et est extrait des hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon), à 95% du temps, principalement le gaz naturel (Planète Energies, 2015), et de l'eau. Le craquage du gaz consiste à séparer les atomes de carbone et d'hydrogène. Jusqu'à quatre fois moins coûteux que l'électrolyse, ce procédé génère cependant une quantité importante de dioxyde de carbone (CO₂). Au point où une voiture à PAC (Pile à combustible) émettrait, du puits à son réservoir, entre 25 et 50% plus de CO₂ qu'une voiture électrique à batterie. Ce qui fait dire au physicien Pierre Langlois que « l'hydrogène est un carburant fossile déguisé » (Templier, S. 2015)²⁴².

c) Le stockage sous forme d'énergie gravitationnelle, tel que le stockage d'énergie par pompage/turbinage dans les centrales de pompes-turbinage, appelée STEP, Stations de

²⁴¹ Comme nous l'avons vu au chapitre 1, « sur Terre, l'hydrogène est associé dans la nature à beaucoup d'autres éléments : surtout à du carbone pour former le méthane (CH₄) et à de l'oxygène pour constituer l'eau (H₂O). Pour obtenir de l'hydrogène pour les besoins industriels, il convient donc de le séparer des éléments chimiques auxquels il est lié » (Planète Energies. (2015). *Comment fabriquer l'hydrogène* . Consulté 7 août 2017, à l'adresse <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/comment-fabriquer-l-hydrogene>

²⁴² Templier, S. (2015). *Voiture à hydrogène: le rêve... et la réalité* | Sébastien Templier | *Auto écolo*. La Presse. Consulté 7 août 2017, à l'adresse <http://auto.lapresse.ca/auto-ecolo/201502/17/01-4844947-voiture-a-hydrogene-le-reve-et-la-realite.php>

transfert d'énergie par pompage des barrages hydro électriques. Lorsque l'eau d'un réservoir est vide, l'énergie électrique excédentaire est utilisée pour pomper de l'eau à l'aval du barrage, afin de remplir le réservoir vidé en amont. L'eau est élevée dans les réservoirs, grâce à la poussée de pompe, pour être par la suite turbinée, c'est-à-dire transformer son énergie potentielle en énergie mécanique par les roues de la turbines, avant d'être transformée en énergie électrique (par un alternateur). «Compte tenu de « la rareté des sites adaptés et des difficultés d'acceptation sociale de nouveaux sites », on utilise le STEP souterrain, « stockage de masse utilisé aujourd'hui est le transfert d'eau entre un réservoir haut et un réservoir bas, avec une capacité mondiale installée de 140 000 MW » « L'utilisation de cavités souterraines comme réservoir bas permet de s'affranchir des impacts visuels et d'utiliser de larges cours d'eau comme réservoirs hauts possibles » (Jacquelin L., & Bader, A., 2013 : 102)²⁴³. Ce stockage sous-terrain permet de stocker du gaz comprimé, de hydrogène) dans des cavités sous-terraines naturelles (Fabrégat, S., 2016)²⁴⁴. Cependant, la disponibilité de terrains propices à cette technique est limitée, les sites adaptés sont rares en général ou déjà occupés. Par ailleurs, il faut accumuler une quantité d'eau importante en hauteur avant que cette technique soit efficace, ce qui nécessite là encore un apport en énergie important.

d) Le stockage inertiel avec volant d'inertie (Guillo, R. s.d.)²⁴⁵ est l'idée de faire tourner une masse pour récupérer l'énergie des énergies renouvelables, transformée en énergie

²⁴³ Jacquelin, L., & Bader, A. (2013). *Le stockage souterrain de l'énergie* (p. 102, pp. 100-107). Geosciences. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01061149/document>

²⁴⁴ Fabrégat, S. (2016). *Stockage souterrain d'énergie : un potentiel à creuser*. *Actu-Environnement.com*. Consulté à l'adresse <http://www.actu-environnement.com/ae/news/stockage-souterrain-energie-cavites-aquiferes-gaz-hydrogene-air-comprime-chaaleur-27930.php4>

²⁴⁵ « Le principe du volant d'inertie permet de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique ». « Un volant d'inertie est constitué d'une masse « entraînée » par un moteur électrique. L'énergie électrique permet de faire tourner la masse [...] qui, en quelques minutes, sera alors stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique (la rotation) L'énergie électrique pourra être « restituée instantanément »

cinétique. Elle sert à ajuster la demande, car le stockage est de courtes durées, de l'ordre d'une quinzaine de minutes. Son avantage est de pouvoir fournir une forte puissance, c'est pourquoi il est utilisé pour la récupération de l'énergie lors du freinage du métro ou d'un autobus afin de la restituer au démarrage (Schwoerer, P., 2017)²⁴⁶.

e) Le super condensateur est un circuit électronique qui accumule l'électricité, qui, tel que le stockage inertiel, est d'utilisation courte. Son temps de stockage est limité à 15 minutes environ. Le stockage d'énergie par volant d'inertie ainsi que le super condensateur sont utiles pour ajuster l'offre énergétique sur le réseau par rapport à la demande, c'est ce qu'on appelle le lissage. Il ne permet pas d'obtenir une durée d'autonomie importante comme les batteries électrochimiques ou le STEP.

Voici un schéma qui récapitule ce qui vient d'être présenté.

par la suite grâce à une génératrice électrique. Guillo, R., Stockage d'énergie par volant d'inertie. *Ecosources.Info*. Consulté à l'adresse

http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie

²⁴⁶ Schwoerer, P. (2017). Le volant d'inertie, un avenir pour la mobilité électrique et les énergies renouvelables?. *Avem*. Consulté à l'adresse <http://www.avem.fr/actualite-le-volant-d-inertie-un-avenir-pour-la-mobilite-electrique-et-les-energies-renouvelables-6396.html>.

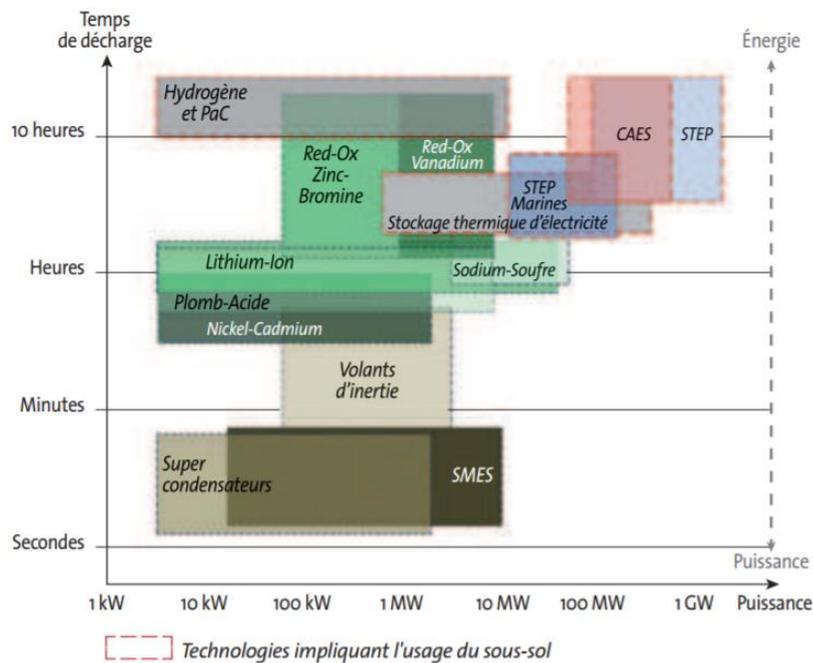


Figure 38. Différents modes de stockage

Source : Jacquelin & Bader, 2013 : 102

On peut donc stocker de l'énergie renouvelable. Cependant, ces solutions de stockage relatives aux énergies renouvelables sont coûteuses et peu efficaces. Les techniques discutées ci-dessus ne permettent pas aujourd'hui de répondre à la demande globale en tout temps, car ces techniques sont lourdes, coûteuses et même parfois non rentables, à tel point que certains se demandent si finalement, il ne reviendrait pas moins cher de laisser filer les excédents énergétiques transformés par les technologies vertes dans la nature (Barnhart, Dale, Brandt & Benson, 2013) and (Mraz, S., 2013)²⁴⁷.

²⁴⁷ Mraz, S. (2013). *Measuring the costs of electrical storage*. Machine Design. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.machinedesign.com/batteriespower-supplies/measuring-costs-electrical-storage>

Barnhart, C., Dale, M., Brandt, A., & Benson, S. (2013). *The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity*. Energy & Environmental Science, 6(10), 2804. doi:10.1039/c3ee41973h

2.3.3.3 Comment gérer l'offre déficitaire?

La nécessité de concentrer de l'énergie diffuse et les défis de stockage font qu'aujourd'hui, il est nécessaire de s'appuyer encore sur le charbon, le gaz, le pétrole, l'hydro électricité et l'énergie nucléaire comme énergie « back-up » de soutien. Faire fonctionner des technologies vertes nécessite donc un couplage avec une autre source d'énergie stockable et non-intermittente, et, dans un souci de garantir la fourniture d'électricité, il faut s'appuyer sur une autre énergie, comme une centrale à gaz. Et puisque la puissance effective d'un parc éolien oscille entre 2 et 80% de la puissance installée, c'est-à-dire qu'elle peut fournir un rendement médiocre de 2% ou bien un très bon rendement de 80%, il faut donc quasiment doubler tout KW installé d'éolien par un KW installé qui fonctionne avec autre chose (Jancovici, J., 2013). Ce qui montre, une fois de plus, que le déploiement des ER entretient une relation de complémentarité et non de substitution avec les énergies non renouvelables. Il n'existe pas de parc éolien pur. Il est toujours couplé avec une autre source d'énergie (gaz, hydroélectricité etc.).

Ces limites physiques doivent logiquement se retrouver dans le coût à la tonne de CO₂ évité de l'éolien (Jancovici, J., 2013). Cela signifie, que l'éolien n'évite pas l'installation d'un autre moyen de production, mais évite d'utiliser cet autre moyen quand le vent souffle ». Le coût évité est donc le coût marginal « à encourir pour alimenter une demande additionnelle » (Hydro-Québec distribution, 2006)²⁴⁸ que l'éolien permet d'obtenir quand il fonctionne. Même cas pour le solaire photovoltaïque. A raison de son faible facteur de production, pour passer au solaire, la puissance installée devra être plus grande, et le coût de stockage (quelques tonnes de batterie par foyer) intégré (Hydro-Québec distribution, 2006). De plus, et contrairement à l'éolien, le panneau photovoltaïque nécessite une consommation énergétique importante soit

²⁴⁸ Hydro-Québec Distribution. (2006). *Les coûts évités : Concepts, résultats et utilisation* (p. 4, 44 pages). Consulté à l'adresse

http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/Suivis/SuiviD-2006-56/HQD_Presentation_12mai06.pdf

sous forme de chaleur soit sous forme d'électricité (fondre du silicium cristallin est très énergivore). En pratique fabriquer un panneau consomme à peu près à l'énergie fournie par le panneau pendant 3 ans (Jancovici, 2013).

2.3.4 Limites théoriques à l'amélioration de l'efficacité énergétique des énergies renouvelables

Rechercher l'efficacité des ER revient à améliorer leur rendement et le retour sur investissement, soit l'EROI. Beaucoup d'études montrent que l'EROI des ER pourrait augmenter. D'ailleurs, on trouve certains ER d'éolien égal à 30 :1, mais seulement, pour de très hautes éoliennes (plus les éoliennes sont hautes, plus elles ont un grand rendement), ce qui ne convient que dans certains espaces. Outre ces défis liés à la dimension de l'éolien, il y a une limite, qu'on appelle limite de Betz. Celle-ci mesure « la quantité maximale d'énergie du vent qui peut être convertie en énergie mécanique (rotation du rotor²⁴⁹) ». Le rendement de conversion entre la puissance reçue par le rotor de l'éolienne et la puissance mécanique convertie porte le nom de capacité aérodynamique instantané (désigné par C_p sur la figure 39). Son rendement maximal, la limite de Betz, est estimé à 59% (C_p à 0,6 sur la figure 39). Ce qui montre qu'avec un système parfaitement efficace, on ne peut capter que 59% du vent. Par exemple, on ne pourra capter que 2 MW d'un vent d'une puissance de 3 MW (Énergie+, Architecture et Climat, s.d.)²⁵⁰.

²⁴⁹ Le rotor de l'éolienne est le composant de l'hélice qui se situe au centre de ses pales.

²⁵⁰ Énergie+, Architecture et Climat, *Le rendement des éoliennes*. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>

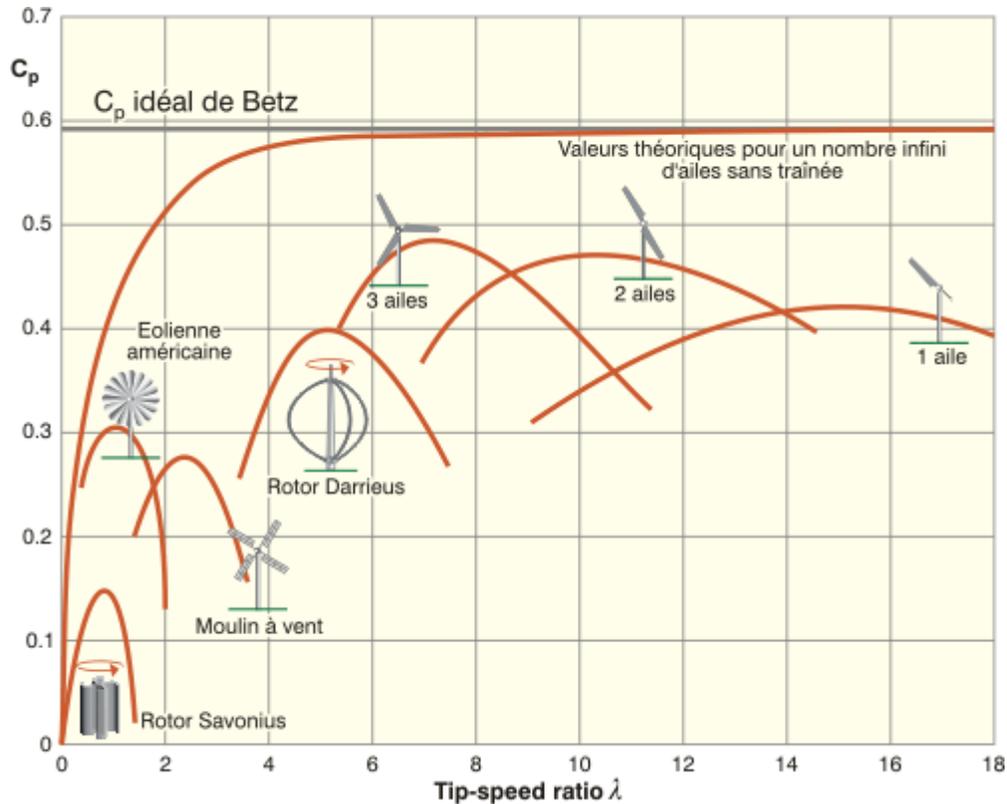


Figure 39. Limite de Betz pour les éoliennes

Source : Énergie+, Architecture et Climat, s.d.

Le but est de savoir, comme le souligne Mark Z. Jacobson, si les ER sont en maturité ou pas, c'est-à-dire savoir si leur efficacité / rendement effectif par rapport à la limite théorique est proche de 1.

La limite du CSP est un autre exemple. Le but est de trouver la puissance optimale par m^2 , compte tenu du fait que plus le gradient de température sera important entre l'air extérieur et le système, plus il y aura de perte énergétique, et donc moins le système sera efficace :

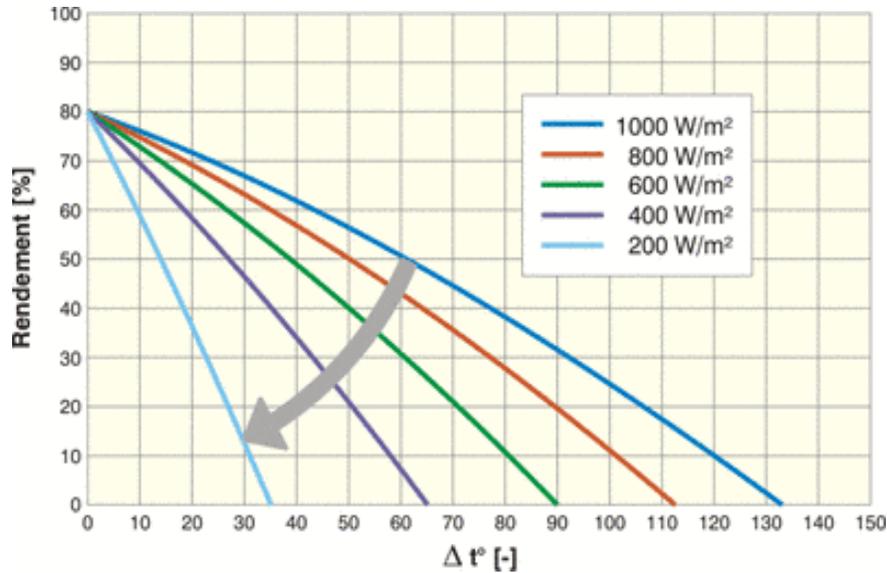


Figure 40. Rendement énergétique de la CSP par m² en fonction du gradient de température

Source : Énergie+, Architecture et Climat, s.d.²⁵¹

Quelles sont les conséquences de ces quatre caractéristiques (densité faible, stockage difficile, intermittence, limite théorique de conversion) sur les coûts énergétiques des ER? Que cela implique-t-il concernant la possible transition énergétique sans compromettre nos conditions d'existence?

C'est ce que nous tentons d'analyser dans les paragraphes suivants.

²⁵¹ Énergie+, Architecture et Climat, *Le rendement d'une installation solaire thermique*. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be>

2.3.5 Coût énergétique des énergies renouvelables

Greer donne l'exemple suivant : « si l'investissement en milliards de dollars, et en quantité d'énergie et de ressources correspondante, pour installer des miroirs dans le désert du Nevada, ne produit pas un rendement aussi élevé que d'autres utilisations énergies et ressources, l'idée des miroirs sera écartée » (Greer, 2013 : 131). Qu'en est-il des coûts (financier et énergétique) des énergies renouvelables par rapport aux énergies fossiles? Y'a-t-il une grande différence? Quels autres facteurs peuvent entrer en jeu? On pourrait penser de manière intuitive que puisque le coût de la matière première des énergies renouvelables est gratuit, il se pourrait qu'elle soit avantagée par rapport à celui des fossiles. Ainsi, afin de mieux comprendre la rentabilité du développement des énergies vertes, il est pertinent de faire une courte analyse sur les coûts de rentabilité financière de ses différentes sources d'énergies. Puisque l'électrification des secteurs fait partie d'une stratégie importante dans la transition énergétique nous allons rapidement évaluer son coût de « production » selon différentes sources d'énergie.

2.3.5.1 Coût normalisé de l'électricité

À cet égard, on utilise souvent le coût d'électricité normalisé (OpenEI, s. d.)²⁵² (traduction libre de « Levelized Cost of Electricity ») ou LCOE. Le LCOE représente le revenu requis pour rentabiliser l'investissement de production d'électricité à partir d'une source d'énergie donnée. Il donne le coût par kilowattheure (en dollars réels) de la construction et de l'exploitation d'une usine de production sur une période de recouvrement assumée.

²⁵² OpenEI. *Transparent Cost data Base*. Consulté à l'adresse http://en.openei.org/apps/TCDB/transparent_cost_database

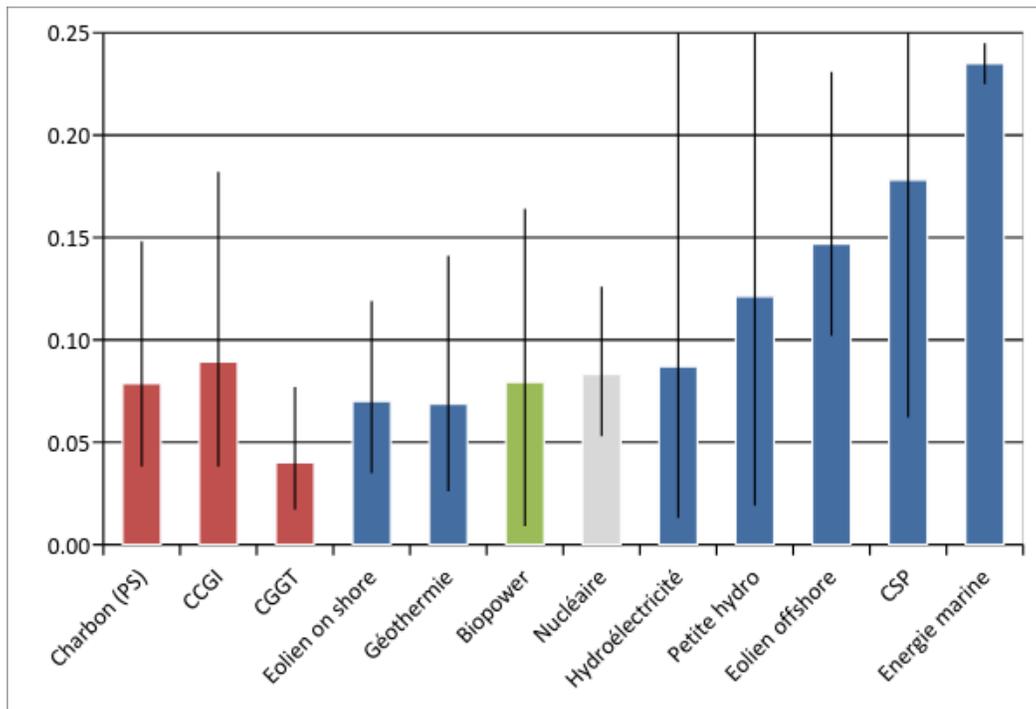


Figure 41. LCOE [dollars/kWh] des différentes sources d'énergie

Source : OpenEI, s. d

L'électricité peut s'obtenir avec des moyens de production divers (charbon, gaz naturel, éolien, biomasse, panneaux solaires, hydroélectricité, énergie marine, et géothermie) qui ne sont égaux ni en coût en capital (le prix d'installation), qui varie entre \$900 à \$5 500 le kW installé selon la méthode (le coût d'installation d'un système de géothermie coûte environ 4 000\$/kW), ni en nombre d'heures de fonctionnement dans l'année (de 2 000 à 8 000 selon le type de centrale), ni encore en prix du combustible (de 0 à 4,67\$/mm Btu). Le mode de production électrique qui demande le plus petit investissement par kWh produit est le gaz à cycle combiné CCGT (4 cents/kWh), raison pour laquelle ce type de centrale est largement construit, bien qu'il émette du CO₂. Juste après vient l'éolien à terre, malgré le plus faible

facteur de capacité²⁵³ (38%), mais qui demande moins d'investissements initiaux que le charbon (de moitié en moyenne) et qui coûte 7 cents/kWh comparé au 8 cents/kWh produit par les centrales à charbon. La géothermie est aussi une alternative moins coûteuse (7 cents/kWh) mais son coût en capital initial est conséquent (\$4 000 US) et son coût de maintenance et d'opération est le plus élevé (environ 30% du LCOE) de toutes les autres énergies renouvelables dont le carburant est gratuit.

La biomasse et le nucléaire ont le même LCOE que le charbon, bien que le coût en capital initial soit inférieur pour la biomasse. Néanmoins, le prix du combustible de la biomasse (\$2 US) représente aussi un coût non négligeable.

Quand on passe à la petite hydro, à l'éolien à mer, à l'énergie solaire concentrée et aux technologies marines, le coût d'investissement est en moyenne doublé, en raison du fort investissement au départ, et à la faible capacité de production. Concernant le coût en capital, celui-ci représente la majeure partie du coût d'électricité pour les énergies renouvelables, représentant 80% en moyenne pour l'hydro-électricité, l'éolien et la géothermie, et allant au-delà de 90% pour le solaire photovoltaïque et le CSP (concentrating solar power). Parmi les énergies renouvelables qui n'ont pas de coût de carburant, le coût en capital de la géothermie représente 70% du coût total. Mais par rapport aux autres énergies renouvelables, les coûts fixes et variables d'opération et de maintenance représentent une plus grande part du LCOE. Pour les énergies ayant un coût de carburant, la part du coût en capital se situe en moyenne à 70%, avec un minimum à 57% pour les centrales biomasses et les turbines à gaz, 70% pour le charbon et un maximum de 80% pour le nucléaire. Concernant le coût du carburant, il représente en moyenne 15 à 20% du LCOE.

²⁵³ C'est le taux de fonctionnement réel d'une centrale sur une année. Comme les énergies renouvelables sont intermittentes, leurs centrales ne fonctionnent pas 24h/24, 7jours/7. C'est donc sur ce taux qu'il faut se fier.

Ainsi, bien que le LCOE des énergies fossiles soit généralement inférieur à celui des renouvelables, l'éolien (pour son faible coût en capital) et la géothermie (pour son facteur de capacité performant) sont des solutions intéressantes en termes de coûts financiers.

On pourrait dire à ce stade que ces évaluations sont encourageantes quant au potentiel des ER pour remplacer les hydrocarbures fossiles.

2.3.5.2 Limites de l'évaluation du coût monétaire

Cependant, les modèles de transition énergétique utilisant l'évaluation monétaire (Sgouridis, Csala and Bardi, 2016)²⁵⁴ sont-ils vraiment fiables? Pour certains chercheurs, la réponse est non. D'abord, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, le coût financier ne reflète pas le vrai coût énergétique. En effet « l'énergie consommée dans un secteur industriel ne représente peut-être que 10% de ses coûts monétaires » (Jancovici, 2013 : 64)²⁵⁵ mais représente un coût énergétique bien plus important pour sa production, au moins 60% d'après Giraud. Aujourd'hui, par exemple, le prix des énergies fossiles est relativement bas et la baisse de leur EROI (Chapitre 1) n'est pas du tout reflétée dans les dépenses. Ainsi, dans des conditions d'avenir incertain quant à l'accessibilité de nos ressources, le coût financier pourrait mettre « un flou quant aux ressources et énergies requises en amont » (Fridley, cité par Heinberg R. & D. Lerch, 2010 : 234).

Aussi, car ces évaluations, basées sur des estimations de coût des technologies des énergies renouvelables, suppose une élasticité constante des fonctions de substitution (Rosen et Guenther, 2015, cité dans Sgouridis S. *et al.*, 2016 : 2). Comme nous l'avons expliqué dans les

²⁵⁴ Sgouris Sgouridis, Denes Csala and Ugo Bardi, *The sower's way: quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition*, (2016), p.2 (8 pages). En ligne <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/094009>>

²⁵⁵ Jancovici, J. (2013). *Transition énergétique pour tous* (p.64, 240 pages). Odile Jacob.

paragraphes précédents, si le prix d'une ressource (pétrole) augmente, alors, toute autre chose étant égale, la demande de cette ressource baissera pour aller chercher d'autres ressources de substitution. Si les ER sont bien des ressources de substitution, alors la demande augmentera. Or pour l'instant nous avons vu que le capital artificiel entretient plutôt une relation de complémentarité avec le capital naturel. Nous savons par ailleurs (ou du moins nous en avons déjà une petite idée puisque nous l'avons déjà évoqué) que les énergies renouvelables ne sont physiquement utilisables qu'avec un capital artificiel. Reste donc à savoir **si le capital naturel sur lequel repose ce capital artificiel peut être 100% renouvelable, autrement dit, si les ER et les EF entretiennent une relation de substitution.**

Si le choix monétaire n'apparaît pas être l'indicateur de performance des ER le plus pertinent, qu'en est-il du rendement énergétique EROI? Pourrait-il nous donner des informations sur le rapport capital artificiel / capital naturel de ces nouvelles technologies?

2.3.5.3 Des rendements énergétiques inférieurs à ceux des fossiles

Pour que les ER puissent se substituer aux fossiles, il faut qu'elles soient aussi performantes, donc qu'elles présentent des rendements énergétiques similaires. Est-ce le cas? Pour rendre compte des différents rendements énergétiques, on utilise l'EROI, mesure présentée au Chapitre 1 et dont les résultats exposés ci-dessous sont extraits du tableau présenté en Annexe 1.

Rappel : Qu'est-ce que l'EROI

L'EROI est une donnée qui mesure l'« accessibilité » de l'énergie. Pour les fossiles et pour les renouvelables, elle rend compte de la difficulté technique « à extraire l'énergie primaire de

l'environnement et à l'apporter sous forme finale à la société » (Court, V., 2017 : 13)²⁵⁶; L'accessibilité est différente de la « disponibilité » de l'énergie qui est « la quantité maximale d'énergie primaire disponible dans l'environnement pour une ressource donnée » (Court, V., 2017 : 13). Ainsi, compte tenu de la tension entre le progrès technique qui rend de plus en plus accessible des gisements souterrains, ou qui améliore le rendement des technologies vertes, et l'épuisement des ressources, on peut dire que l'EROI mesure l'évolution de « la lutte qui s'opère entre progrès technique et épuisement physique des ressources énergétiques » (Court, V., 2017 : 14).

Et c'est pourquoi il s'avère une mesure essentielle dans notre cadre d'étude.

Que signifie alors l'EROI

L'EROI_{st} 80 :1 du charbon signifie qu'1 MWh d'énergie extraite du stock de charbon suffira pour extraire 80MWh d'énergie potentielle (avant transformation) contenue dans une mine charbon. Pour de l'éolien, un EROI_{st} de 18 :1 montre qu'il suffira de mobiliser l'énergie d'une éolienne **durant son cycle de vie** (on parle d'une quantité sur une période, donc d'un flux) pour en produire 18 autres. Et c'est là toute la différence entre un rendement énergétique fossile et renouvelable. On va calculer l'EROI fossile par rapport à son extraction. Pour du renouvelable, on va prendre sa durée de vie (d'une vingtaine d'années en moyenne pour l'éolien et le solaire).

Que disent les résultats?

Source	EROI
Charbon	80 – 100 :1

²⁵⁶ Court, V. (2017). *Taux De Retour Énergétique (Tre)* (p. 7;13, 26 pages). Séminaire HEC Énergie. Consulté à l'adresse <https://victor-court.com/>

Pétrole	20-30 :1
Gaz	40-60 :1
Hydro-électricité	50-100 :1
Eolien	15-20 :1
Biocarburant (éthanol)	10 :1
Panneaux Solaires	4-12 :1
Biocarburants (excepté l'éthanol)	1-2 :1

Tableau VIII. EROI des énergies fossiles et de quelques énergies renouvelables

Source : Court, 2016 : 121 & 134, voir annexe 1

On constate que la plupart des énergies alternatives renouvelables et non conventionnelles ont des EROI assez faibles et bien inférieures à ceux des énergies fossiles conventionnelles. Parmi les EF, « le charbon, le pétrole et le gaz ont des EROI représentatifs respectifs d'environ 80-100, 20-30 et 40-60 » (Court, V., 2016 : 134). Parmi les énergies renouvelables, **l'hydroélectricité** présente le **meilleur rendement énergétique** avec un EROI compris entre 50-100 pour les barrages hydro-électriques²⁵⁷. Les centrales éoliennes et solaires ont de plus faibles rendements, avec un EROI de 15-20 pour l'éolien et de 4-12 pour les solaires. Concernant les biocarburants, « la canne à sucre fournit l'éthanol avec un EROI relativement élevé de 10, mais toutes les autres matières premières ont un EROI très faible autour de 1-2. » (Court, V., 2016 :134). On comprend bien alors que les biocarburants ne pourraient remplacer le pétrole conventionnel car leur rendement énergétique moyen est bien inférieur à celui du pétrole conventionnel.

²⁵⁷ Le grand écart de valeur des EROI des barrages s'explique par leurs différentes tailles et leur emplacement géographique.

Ainsi, **si l'on se fie à l'EROI, on peut dire que les ER ne pourront se substituer aux sources d'énergies fossiles, car leur coût énergétique de ces derniers est bien plus grand pour délivrer la même quantité d'énergie.** Mais pourrait-on dire que puisque l'énergie éolienne est une énergie renouvelable, cela ne pose pas de problème?

« Par exemple, il est facile d'affirmer que la quantité d'énergie solaire tombant annuellement sur une petite partie du désert du Nevada équivaut à la quantité d'énergie électrique utilisée aux États-Unis en un an, puis de sauter à la conclusion qu'en couvrant une centaine de kilomètres carrés du Nevada de concentrateurs qui convertiront l'insolation en vapeur, tout ira pour le mieux. » (Greer, 2013 : 130).

Dans ce discours, Greer voit une erreur d'ordre physique sur le bilan énergétique net. Il faut bien comprendre que lorsqu'on calcule l'EROI de l'éolien, on calcule **le coût énergétique de la technologie éolienne**, et que si l'on soustrait le **coût énergétique** pour l'installation, le stockage et la maintenance de ce système à l'énergie que celui-ci devait produire, il ne reste pas grand-chose:

« Les nouvelles technologies renouvelables ont des EROI relativement faibles, en particulier lorsque leur nature intermittente et le coût énergétique ultérieur pour les systèmes de sauvegarde et de stockage sont pris en compte. Par conséquent, les panneaux photovoltaïques ont des EROI d'environ 4-12 (durant leur cycle de vie), mais ceux-ci peuvent tomber à 2,45 :1 lorsque le coût énergétique associé aux systèmes de sauvegarde et de stockage est pris en compte » (Thévard, B., 2013 : 3).

Le problème vient du fait qu'il s'agit de mobiliser un flux, et non pas un stock. Un EROI de 18 :1 pour de l'éolien, dont la durée de vie est de 20 ans, montre qu'il faudra attendre au moins 1 an pour que la centrale éolienne soit rentabilisée, c'est-à-dire que la quantité fournie soit suffisante pour qu'elle puisse à elle seule en fabriquer une autre. En fait, comme nous l'avons montré au Chapitre 1, parler d'un flux énergétique renouvelable et d'un stock énergétique non renouvelable implique de grandes différences dans la façon de transformer l'énergie, et donc de grandes différences quant à leur coût énergétique respectif.

En somme, et contrairement aux évaluations du coût monétaire, les ER ont des rendements **énergétiques** bien inférieurs à ceux des fossiles. D'autant plus que pour un flux d'énergie renouvelable, on mobilise une durée. Ce qui les désavantage par rapport aux EF et leurs stocks accessibles instantanément. Ces rendements plus faibles montrent alors que pour répondre aux besoins énergétiques humains, il faudra mobiliser plus d'énergie en amont et donc qu'un apport en énergie fossile est nécessairement requis. Or, dans un contexte où la transition énergétique est urgente, leur développement risque de demander un flux d'énergie trop important qui risque d'empiéter sur la quantité requise pour faire fonctionner une économie. La question qui se pose alors est la suivante :

Dans un contexte où la transition énergétique s'avère urgente, est-ce possible de mobiliser plus d'énergie en amont sans compromettre les conditions d'existence de nos sociétés de croissance?

2.3.6 Le risque du cannibalisme énergétique

Le cannibalisme énergétique se réfère à un effet où la croissance rapide d'une technologie crée un besoin d'énergie qui utilise, autrement dit, cannibalise l'énergie des centrales ou appareils existants (Kenny R., Law C. & J. Pearce, 2010 : 1970)²⁵⁸.

Le cannibalisme énergétique est une notion mis en avant pour la première fois par J.M. Pearce dans son article *Optimizing Greenhouse Gas Mitigation Strategies To Suppress Energy*

²⁵⁸ Kenny, R., Law, C., & Pearce, J. (2010). Towards real energy economics: Energy policy driven by life-cycle carbon emission. *Energy Policy*, 38(4), 1969-1978. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.078

*Cannibalism*²⁵⁹ publié en 2009. Celle-ci renvoie au **flux d'énergie** et à la dynamique de la transition énergétique. Le cannibalisme énergétique se réfère donc au rythme de développement d'une énergie. Il s'observe lorsque les ressources énergétiques nécessaires pour la construction des nouvelles infrastructures en termes d'énergie (Pearce, 2008), **amoindrissent l'énergie nette réellement disponible pour les besoins énergétiques de la société**. Il est important de le prendre en compte car certaines voies de transition énergétique reposant par exemple sur un mix énergétique biomasse, nucléaire et émissions négatives provenant du captage et du stockage du carbone, ont des efficacités incertaines (Van Vuuren et al. 2007, 2011, cité dans Sgouridis S. et al., 2016 : 2), car elles surestiment souvent le potentiel de ces options et sous-estiment les coûts relatifs ou son « cannibalisme énergétique ».

La relation entre le cannibalisme énergétique et l'EROI est que plus ce dernier est élevé, plus le stock en place produit de l'énergie et moins il y a de chances que la nouvelle production cannibalise de l'énergie. Cependant, avec un EROI plus faible que celui des fossiles, accentué par des **EROI fossiles en décroissance** sur lesquels elles s'appuient, **le secteur énergétique des renouvelables cannibalise de plus en plus l'énergie** qu'il est censé produire pour le reste de la société et non pas pour assurer son propre fonctionnement. Donc si on veut éviter le cannibalisme, il faut ralentir le développement des modes de « production » portant sur des énergies à faible EROI.

Quel EROI minimal est requis pour maintenir la croissance économique dans une société Nord-américaine moderne par exemple?

« On pourrait considérer qu'un EROI_{st} de 1,1 :1 pour du pétrole est un résultat suffisant. En effet, le surplus de 10% obtenu en tête de puits permet de fournir l'énergie d'extraction.

²⁵⁹ Pearce, J. (2009). *Optimizing Greenhouse Gas Mitigation Strategies To Suppress Energy Cannibalism*. Ontario. Consulté à l'adresse

<https://pdfs.semanticscholar.org/41bc/80f62ed1e78f795cd8000d024c4a54ddf8ed.pdf>

Cependant, le pétrole devra rester sur place et à l'état brut. Pour pouvoir le raffiner et le transporter jusqu'aux stations-service, il faut un EROI_{st} de 1,5 : 1. Pour construire les infrastructures et les modes de transport qui permettront d'utiliser le pétrole raffiné, l'EROI_{st} doit être au minimum de 3,3 : 1. Mais cela ne suffit pas pour faire fonctionner une société industrielle. Parmi les autres besoins essentiels, il faut produire l'alimentation (5:1), permettre à la population de vivre dans de bonnes conditions (7:1), maintenir un système éducatif (10:1), un système de santé (12:1) et enfin, permettre l'entraide et la solidarité grâce aux services sociaux et la transmission culturelle au travers de l'art et des loisirs (14:1). » (Benoit Thévard, 2013 : 4).

Pour Heinberg & Lerch (2010), l'EROI minimum requis pour maintenir une société industrielle serait de 5 : 1, c'est-à-dire que cette société pourra mobilisée au maximum 20% de son énergie qu'elle « produira » pour en produire d'autres, sans empiéter sur l'énergie requise pour faire fonctionner sa société. Au-delà de ce taux, c'est-à-dire pour des EROI inférieurs, elle devra mobilisée de l'énergie utilisée pour des services (santé, éducation, transport etc.). L'écart avec la mesure de Thévard tient du fait que Heinberg s'appuie sur des types de société avec un train de vie plus frugale et moins d'industrie. Ces mesures nous donnent une idée des besoins énergétiques de nos sociétés, pour assurer leur reproduction. Ainsi, seules les énergies présentant un EROI supérieur à 5 : 1 (paragraphe précédent) sont à l'abri du cannibalisme énergétique, ce qui est le cas pour toutes les énergies exceptée pour les panneaux solaires au rendement énergétique de 4 : 1. Mais dans un contexte économique d'Amérique du Nord, qui est l'une des sociétés les plus consommatrices au monde, il faudra s'appuyer sur le seuil mesuré par Thévard. Par ailleurs, cette notion de cannibalisme énergétique intègre une dimension temporelle. Donc si on veut éviter le cannibalisme, il faut ralentir le développement des modes de « production » portant sur des énergies à faible EROI. Le problème est que nous n'avons pas trop de temps pour effectuer la transition énergétique.

C'est pourquoi il faut **faire attention avec la croissance rapide d'une industrie énergétique** spécifique qui crée un besoin d'énergie risquant de cannibaliser l'énergie des centrales existantes pour alimenter l'énergie des futures centrales. Il est donc préoccupant que le

déploiement à grande échelle de la technologie éolienne et photovoltaïque, à +20% de croissance par année pendant 5 ans puis 10% par année jusqu'en 2050 dans le monde (Sgouridis *et al.*, 2016) nécessitera probablement la construction de grandes infrastructures de stockage à forte intensité énergétique. Cela conviendrait à conclure qu'il faille un EROI de 14 :1 pour le solaire pour soutenir de manière convenable pareil rythme.

Aussi, cela pose un problème concernant l'apport en métaux Fridley donne l'exemple du film solaire. Celui-ci utilise de l'indium, dont les réserves sont limitées²⁶⁰. Dans un contexte de croissance économique avec une demande d'énergie accrue, l'extraction de l'indium sera trois fois plus grande en 2030 qu'en 2010 ce qui risquerait de cannibaliser l'énergie et empêcher le déploiement des panneaux solaires.

Un autre challenge se situe dans le temps de commercialisation des énergies alternatives proposées. Les nouvelles solutions, souvent très médiatisées et présentées comme des innovations « révolutionnaires », demandent en fait beaucoup de temps pour être perfectionnées et optimisées avant d'être commercialisées à grande échelle, ce qui prend en général 20 à 25 ans depuis la sortie du produit en laboratoire (Fridley, 2010).

Notons par ailleurs qu'après une vingtaine d'année, **durée de vie moyenne des installations** solaires et éoliennes, il faut commencer à remplacer le parc existant. L'énergie requise pour remplacer le parc existant vient donc s'ajouter à la puissance qu'il faudra installer²⁶¹. Si par exemple une centrale de panneaux solaire a demandé un investissement énergétique de 100 MWh, avec un EROI de 10 et un cycle de vie de 20 ans, alors elle produira, durant son cycle de vie, 10×100 MWh soit 1000 MWh (ou 1 GWh) soit en moyenne 50 MWh/ an. Cela veut

²⁶⁰ Une étude de 2007 montre qu'au taux actuel de consommation, les réserves d'indium dureront seulement 13 ans. (David Cohen, cite par Heinberg & Lerch, 2010 : 234).

²⁶¹ La puissance installée est la capacité maximale théorique d'une centrale. Pour connaître sa puissance réellement fournie, il faut multiplier ce facteur avec le facteur de capacité, voir au paragraphe 3.3.3.

dire qu'il faudra attendre 2 ans avant que celle-ci soit énergétiquement rentable. Avant ces deux années elle aura donc cannibalisé l'énergie utilisée pour d'autres utilisations. Ainsi, en cas de croissance explosive, on pourrait générer un flux trop important d'énergie par rapport au stock en activité, c'est-à-dire qu'on dépenserait beaucoup d'énergie pour la fabrication et l'usage des énergies renouvelables (par exemple 500 MJ) supérieure au stock en activité (300 MJ). Il est donc fondamental de suivre l'évolution de l'EROI des technologies, car il permet de rendre compte de l'évolution à la fois de l'épuisement des ressources et des améliorations de rendements.

Pour modéliser une transition énergétique, l'EROI, le cycle de vie et la qualité des ressources disponibles sont centrales (Sgouridis S. *et al.*, 2016). Par exemple, dans le cadre d'une transition énergétique soutenable (SET) :

—The easiest pathway requires installation of RE plants to accelerate from 0.12 TW/yr. in 2013 to peak between 7.3 and 11.6 TW/yr. in the late 2030s, for an early or a late fossil-fuel phase-out respectively in order for emissions to stay within the recommended CO2 budget.” (Sgouridis S. et al., 2016 : 1).

Dans le but de ne pas cannibaliser toute l'énergie disponible et ne pas provoquer de récession économique, l'EROI endosse en effet le rôle de chef d'orchestre quant au rythme de contraction des combustibles fossiles, au développement des technologies vertes et à l'investissement énergétique nécessaire pour soutenir ce taux (Lambert, Hall, Balogh, Gupta & Arnold, 2014)²⁶².

Ainsi, la demande future d'énergie dépendrait de l'intensité énergétique de l'économie et l'infrastructure nécessaire pour stocker et utiliser les RE passer de 0,12 TW/an à 7,3 TW/an

²⁶² Lambert, J., Hall, C., Balogh, S., Gupta, A., & Arnold, M. (2014). Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*, 64, 153-167. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.001

(Sgouridis *et al.*, 2016: 4) revient à multiplier la production par 60, ce qui est un déploiement exceptionnellement important. Par conséquent, il faudrait peut-être assumer une stabilisation de la consommation énergétique par personne, ce qui se réfère à l'état stationnaire de Daly, voire même à une décroissance :

*—Interms of gross average power per capita, estimates range from a low 1400 W (Jacobson and Delucchi 2011), 2000 W as a lower limit for a high-income society (Marechal et al 2005), up to 10 000 W (Pickard 2014, Trainer 2014). A study of a deep, yet still partial decarbonization, for the state of California modeled the transition **from 6570 W/person in 2010 to 3800 W/ person by 2050 W**” (Sgouridis *et al.*, 2016: 3).*

Dans le scénario proposé par Sgouris Sgouridi, Denes Csala and Ugo Bardi, on voit que les énergies fossiles sont le support de la transition énergétique avec des émissions de combustibles fossiles conformes à un plafond de CO₂ de 990 Gt atteignant leur maximum en 2020 et sont éliminés progressivement d'ici à 2075. La ligne pointillée représente l'énergie nette disponible alors que les valeurs ci-dessus représentent l'investissement énergétique dans la construction et l'exploitation du système énergétique.

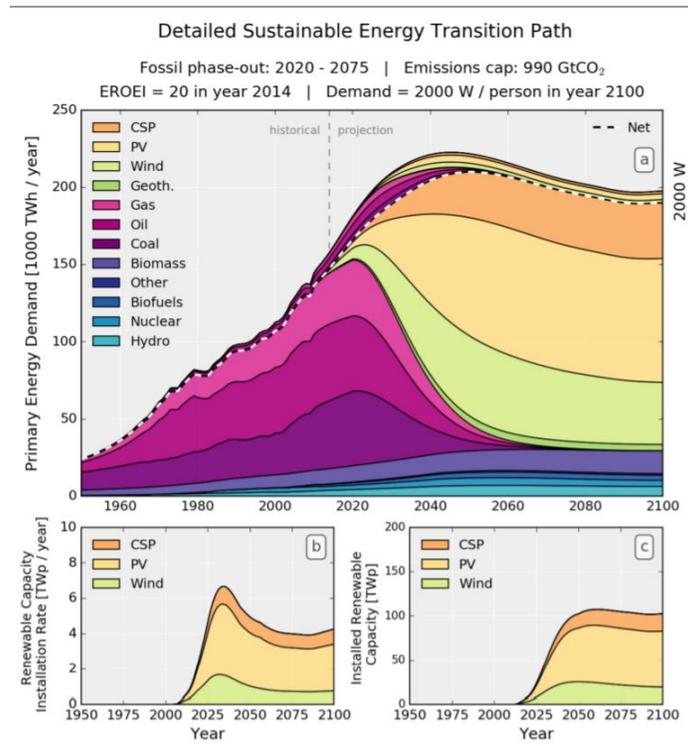


Figure 42. L'évolution de l'offre d'énergie primaire pour fournir 2000 W de puissance nette moyenne par habitant d'ici 2100 à une population de 10,8 milliards

Source : Sgouridis, Csala & Bardi, 2016: 5²⁶³

²⁶³ Sgouridis, S., Csala, D., & Bardi, U. (2016). The sower's way: quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/094009>

2.3.7 Et l'énergie nucléaire?

« L'énergie nucléaire dépend d'un combustible fossile, l'uranium, dont le minéral radioactif est contenu dans le sous-sol de la Terre. Elle permet de produire de l'électricité, dans les centrales thermiques nucléaires, appelées centrales électronucléaires, grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium » (EDF, 2017)²⁶⁴

Concernant l'énergie nucléaire, elle présente l'avantage d'avoir un facteur de capacité élevé, de ne pas être intermittente, d'avoir sa matière première stockable, d'avoir son prix de matière première stable, d'avoir une durée de vie très longue et de diminuer les GES.

Ainsi, peut-on concevoir dans des délais rapides la construction d'assez de centrales nucléaires pour remplacer les fossiles?

L'uranium étant une ressource limitée, concevoir dans des délais rapides la construction de centrales nucléaires risquerait d'épuiser cette ressource. Qui plus est, une centrale nucléaire utilise une grande quantité d'uranium. Par ailleurs, outre le fait que tout avantage à utiliser cette technologie « comme la diminution des polluants dans l'air, pourrait être contrebalancé par de graves problèmes environnementaux encore non résolus, nous faisons face à un problème d'entreposage. En 2000, le Canada avait accumulé 35 000 tonnes de déchets nucléaires hautement radioactifs sans aucun endroit pour les entreposer. En raison de leur période radioactive de 25 000 ans, les déchets nucléaires demeurent dangereux pendant 250 000 ans, ce qui représente des coûts énergétiques considérables. Par exemple, refroidir les piscines où sont entassés les déchets radioactifs nécessite un apport énergétique colossal pour les maintenir froides. Également, l'extraction de l'uranium requis pour l'énergie nucléaire exige

²⁶⁴ EDF. (2017). *Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?*. EDF France. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire>

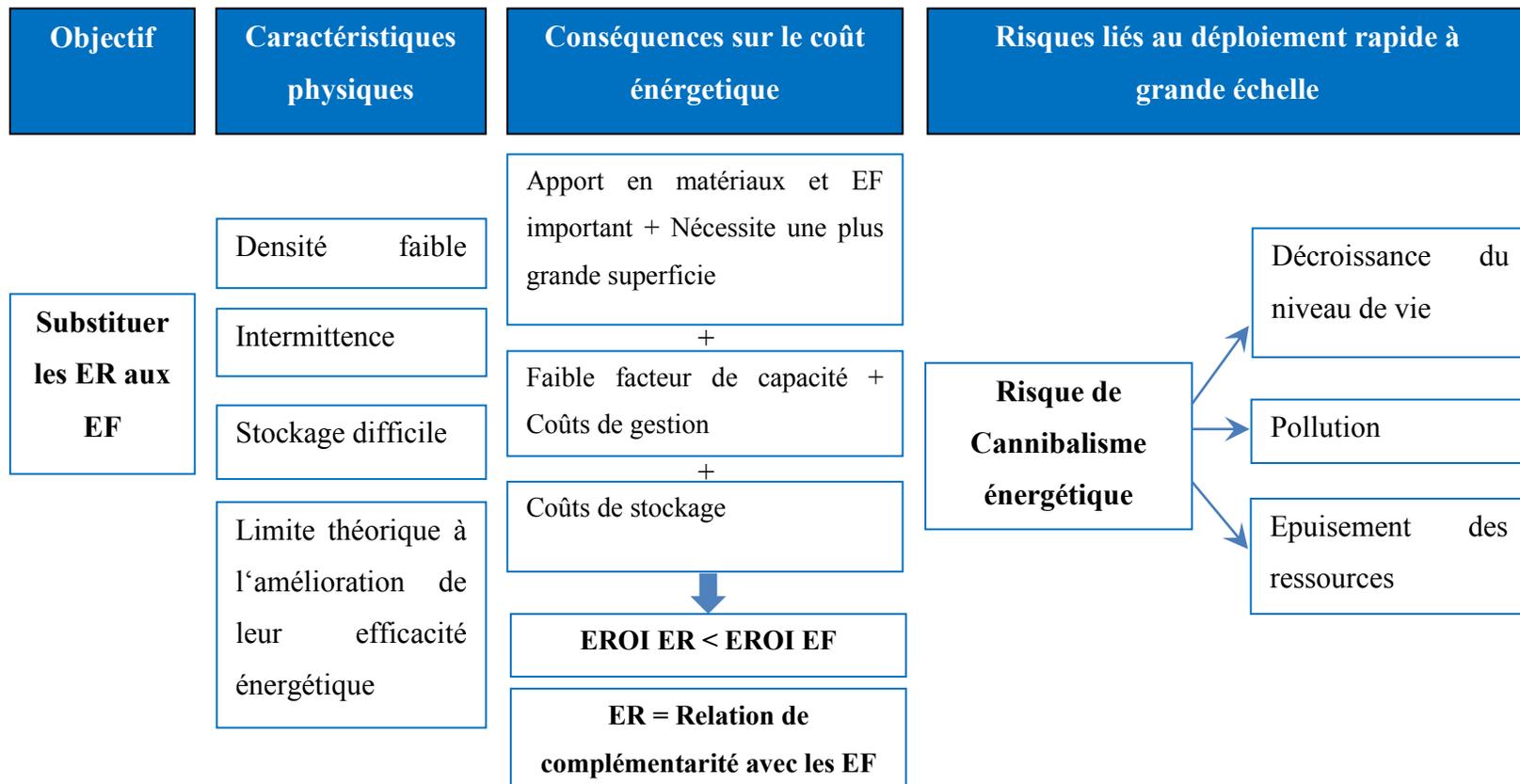
des ressources énergétiques formidables, ce qui signifie que l'énergie nucléaire est, en fait, une source considérable d'émissions de gaz à effet de serre. » (Fondation David Suzuki, 2014)²⁶⁵

²⁶⁵ Fondation David Suzuki. (2014). *L'énergie nucléaire*. . Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-dintervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/lenergie-nucleaire/>

2.3.8 Conclusion du paragraphe 2.3

Les limites inhérentes à la possible substituabilité des EF par les ER sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau IX. Tableau Récapitulatif des limites et des risques associés à la substitution des fossiles par les renouvelables



2.4 Conclusion du chapitre 2

La question soulevée tout au long de ce mémoire est la suivante : peut-on accomplir la transition énergétique sans décroissance économique? Autrement dit, serons-nous capable de continuer à vivre avec la croissance économique qui suppose l'accroissement des flux énergétiques? Les deux conditions du maintien de la croissance et l'atteinte des objectifs pour limiter le RC sont :

- 1/ Substituer les fossiles aux ER
- 2/ Rendre nos systèmes plus efficaces grâce au progrès technique.

Est-ce possible?

Le Chapitre 2 montre qu'il y a probablement des limites physiques et économiques à cette transition écologique, ce qui n'exclut pas d'autres limites, politiques ou sociologiques, par exemple.

1/ La croissance économique serait en fait gouvernée par les lois de la physique, et en particulier, celles de la thermodynamique. En différenciant les flux énergétiques des stocks dans la fonction de production économique, Daly démontre qu'une croissance infinie n'existe pas, car elle est limitée par le stock fini terrestre, et le flux énergétique, c'est-à-dire le rythme de transformation de ce stock.

2/ Selon la pensée de Roegen et de Rodier, notre économie suit une loi de dissipation et donc un état de dégradation constat et inévitable. Sur le long-terme, nous nous dirigeons inexorablement vers moins de richesses.

Concernant la première stratégie qui repose sur l'efficacité, la question est donc de savoir dans quelle mesure les gains en productivité et la dématérialisation de l'économie peuvent-ils réduire cet état de dégradation? La réponse à cette question se résume à cinq remarques principales.

Sur le plan théorique :

1) Le facteur technologique entretient une relation de complémentarité avec le capital naturel. Il ne serait donc pas, comme l'affirme Solow, la panacée à une croissance infinie. Faire descendre le facteur technologie de son piédestal a plusieurs conséquences. Les gains d'efficacité énergétique (gain énergétique dans la conversion d'énergie, recyclage) qui nous permettrait de réduire notre consommation sans décroissance sont limités par la relation de complémentarité qui montre que ces efforts reposent toujours sur un flux de capital naturel qui s'épuise. Dans le processus économique de transformation du capital naturel en déchet sans valeur, les gains de productivité et la dématérialisation de l'économie ne seraient qu'un moyen de polluer moins... pour polluer plus longtemps.

Dans une société productiviste/consumériste, les gains d'énergie réalisés grâce au progrès technique tendent à être annulés par le fait que l'objectif n'est pas de produire ou consommer moins. Le progrès technique stimule au contraire l'utilisation des ressources énergétiques : c'est **l'effet rebond**. Il part du principe suivant : un produit plus efficace coûterait moins cher car il nécessiterait moins d'intrants de matières et d'énergie. Ce qui permettrait aux individus d'amplifier l'utilisation ou bien de développer d'autres activités économiques. L'effet rebond, représente ainsi, de manière directe ou indirecte, la croissance de la consommation énergétique. Cet effet montre donc que les gains de productivité ne réduiraient pas nos déchets. Au contraire, les gains de productivité entraîneraient une consommation matérielle et

énergétique croissante car le gain d'énergie qu'on pourrait acquérir grâce au progrès technique serait utilisé ailleurs.

C'est pourquoi les plans de transition énergétique qui misent sur le progrès technique pour rendre les systèmes énergétiques plus efficaces font face à une impasse, dont on peut entrevoir les premiers soubresauts. Reste à voir donc, dans un contexte de transition énergétique, si les ER ne permettent pas tout de même de repousser à bien plus tard la fin de la croissance (c'est le sujet du paragraphe 2.3).

En ce qui concerne la deuxième stratégie de transition énergétique, c'est-à-dire celle de pouvoir substituer aux fossiles des énergies renouvelables, on doit admettre, tel que le soulève David Fridley, que nous faisons face à un problème « d'échelle et de temps », soit, encore une fois, à un problème de flux énergétique. Les ressources nécessaires à la production d'énergie alternative à petite échelle – énergie ne représentant qu'une fraction de la production énergétique totale – n'ont jusqu'alors peu ou pas posé de problème. Mais comme ces énergies sont amenées à être produites à grande échelle, et rapidement, et compte tenu de leur rendement énergétique plus faible que celui des énergies fossiles, cela pose un risque de cannibalisme énergétique lié au problème de stockage, d'intermittence et d'utilisation de ressources polluantes. Ces limites physiques sont résumées dans le tableau IX.

Ainsi, la première stratégie de réduire l'usage des fossiles vue dans le paragraphe 2 du chapitre 1 en assurant un découplage entre la croissance économique et la décroissance de la production de déchets défendue par les adeptes de la transition énergétique, c'est-à-dire la possibilité de maintenir une croissance économique tout en diminuant nos déchets (Jackson, T., 2009) butent alors sur ces limites-là.

La croissance infinie sur terre, même celle que l'on nomme verte semble donc impossible.

La réponse à notre question de recherche semble donc assez claire : dans l'état actuel de nos connaissances et des techniques que nous maîtrisons, le projet d'une transition énergétique sans décroissance de la production semble tout à fait impossible. Évidemment, l'avenir reste ouvert et le futur est inconnaissable. Rien n'interdit de penser notamment que des découvertes scientifiques permettent de repousser en partie certaines des limites que nous venons de souligner dans ce deuxième chapitre. Mais pour l'heure, les objectifs que ce projet de transition énergétique s'est donné semblent trop ambitieux :

« [...] Les inquiétudes soulevées par le changement climatique ainsi que par le pic pétrolier se disputent l'attention sur fond de craintes d'un effondrement économique [...] Un monde dans lequel tout continue simplement comme à l'habitude est désormais inconcevable. Mais qu'est-ce qu'un monde peuplé par environ 9 milliards de personnes qui atteindraient toutes le niveau de richesse attendu dans les pays de l'OCDE? Une telle économie devraient avoir quinze fois la taille de l'économie actuelle (75 fois celle de 1950) et 40 fois la taille de l'économie actuelle d'ici la fin du siècle (200 fois celle de 1950) » (Jackson, 2009 : 30). »

Sur la base de ce constat, il nous a semblé important d'examiner les plans de transition qui ont été élaborés au cours des dernières années en Occident. Nous nous sommes posé trois questions principales au sujet de ces plans. 1) Dans quelle mesure tiennent-ils compte des obstacles que nous avons identifiés précédemment? 2) Comment ces plans envisagent-ils de faire face à ces obstacles? 3) Quels sont les premiers résultats obtenus dans les collectivités qui ont mis en œuvre un tel plan?

Un seul d'entre eux nous a semblé intéressant, le plan de transition allemand, l'« Energiewende ». C'est l'un des premiers du genre, il ne manque pas d'ambitions (il vise en effet notamment la disparition du nucléaire) et il est mis en œuvre depuis plusieurs années déjà. C'est donc au sujet de ce plan que nous nous sommes posés les trois questions précédentes.

Chapitre 3. L'Énergiewende comme terrain d'analyse

La transition énergétique allemande, dénommée Energiewende, est la base de la politique énergétique du pays. Elle désigne une politique de réduction des émissions carbone en accord avec le Protocole de Kyoto et dont l'objectif est de réduire de 40% ses émissions entre 1990 et 2020. Elle vise par ailleurs une réduction de 80 à 95% de ses émissions d'ici 2030 « tout en maintenant le niveau de vie » des Allemands (Morris G., & M. Pehnt, 2015 : 12). Pour y parvenir, le plan propose une stratégie de 1) **substitution des sources d'énergie renouvelables aux énergies fossiles allemandes**, associée à une 2) diminution de la consommation d'énergie en amont du flux énergétique, à travers une **production plus efficace**, dans le souci de maintenir la **croissance économique**.

3.1 Brève histoire de l'Énergiewende

L'Énergiewende, traduit par « tournant énergétique », est le nom du projet politique de transition énergétique en Allemagne.

Au niveau citoyen, l'Énergiewende émane d'une utopie pensée par une « fraction du courant écologiste » (Theurillat-Cloutier, A., 2014)²⁶⁶ qui, dès les années 1970, affirme son opposition au nucléaire et son scepticisme face à une croissance économique salvatrice (Theurillat-Cloutier, A., 2014). Elle démontrait ainsi que d'autres voies en fait « d'approvisionnement énergétique » pouvaient exister (Morris G., & M. Pehnt, 2012 : 168). À l'instar du *Die Wende* (tournant politique) allemand, symbolisé par la chute du mur de Berlin en 1989, l'utopie de

²⁶⁶ Theurillat-Cloutier, A. (2014). *D'une impasse à une autre. Raisons sociales*. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://raisons-sociales.com/articles/dune-impasse-autre/>

l'Énergiewende rassemble d'abord de nouvelles aspirations et cette volonté de faire prendre à l'Allemagne un tournant énergétique « radical » (Deshaies, M., 2014 : 2). Sur le plan politique, le gouvernement fédéral allemand répond d'abord timidement à cette volonté de changement en créant en 1974 l'Agence fédérale de l'environnement. Sur le plan de la recherche, une première étude intitulée *Energiewende* est réalisée en 1980 par l'Institut allemand d'écologie appliquée. En réaction à la critique du productivisme (Theurillat-Cloutier, 2014), cette étude postule que la croissance économique est compatible avec une réduction de la consommation d'énergie.

Il faut attendre jusqu'en 1998, avec l'arrivée au pouvoir du gouvernement fédéral de la coalition rouge-verte²⁶⁷ pour que s'ouvre une nouvelle page dans l'histoire de la transition énergétique allemande (Deshaies, M., 2014). L'accord de coalition pour organiser « la sortie du nucléaire » fait passer l'*Energiewende* de l'utopie rêvée à la mise en action. Dans cet élan, le 1^{er} avril 2000, l'*Energiewende* reçoit le support législatif du gouvernement (Theurillat-Cloutier, 2014). Celui-ci adopte la loi *Erneuerbare Energie Gesetz* (EEG²⁶⁸), véritable « force motrice clé » de la transition (ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie [BMWI], 2017)²⁶⁹. Cette loi établit une politique de tarif de rachat avantageux en faveur des énergies renouvelables. Ce système de tarifs d'achat avantage pendant 20 ans les producteurs d'énergies renouvelables, en garantissant « à toute personne qui investit dans la production d'électricité de remplacement une rémunération fixe pour chaque kilowattheure d'électricité verte, couvrant davantage que les coûts encourus » (Les Affaires, 2015)²⁷⁰ et rendant ainsi

²⁶⁷ Gouvernement de coalition alliant le SPD et les Verts (Theurillat-Cloutier, 2014).

²⁶⁸ *Loi sur les Sources d'énergie renouvelable*.

²⁶⁹ Ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie, [BMWI]. (2017). *Énergies vertes pour l'avenir*. Berlin disponible à <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/energies-vertes-pour-l-avenir.html>

²⁷⁰ *La transition réussie de l'Allemagne vers les énergies renouvelables*, Les Affaires, Montréal, 18 novembre 2015, <http://www.lesaffaires.com/dossier/changements-climatiques-40-solutions-qui-font-une-la-transition-reussie-de-l-allemande-vers-les-energies-renouvelables/583364>

l'investissement dans ce secteur particulièrement attractif » (Bruns *et al.* 2009, 2010; Mautz *et al.*, 2008, cité dans Deshaie M., 2014). En avril 2002, le gouvernement fédéral allemand adopte la *Loi sur la cessation programmée de l'utilisation de l'énergie nucléaire* avec une sortie du nucléaire prévue à l'horizon 2021. En septembre 2010, le gouvernement allemand formalise une « stratégie énergétique » ou *Energiekonzept* (Boulanger, V., 2015 :12)²⁷¹ à l'aide de textes de lois établissant des objectifs concrets (Boulanger, V., 2015).

Craig Morris, journaliste scientifique, et Martin Pehnt, chercheur dans le secteur de l'énergie, ont décidé de raconter ce processus sous forme d'un rapport. En 2012, à l'initiative de la Fondation Heinrich Böll, ils publient *Energiewende*, décrivant l'avancée de la transition énergétique allemande. C'est à partir de ce rapport et du programme établi par le ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie [BMWI] que nous établirons notre analyse.

3.2 Objectifs du projet

« La transition énergétique prépare le terrain pour un avenir sûr, respectueux de l'environnement et économiquement performant. Nous avons décidé de transformer fondamentalement l'approvisionnement énergétique de l'Allemagne et de passer de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles aux énergies renouvelables. Notre énergie devra provenir de sources renouvelables à hauteur de 40 à 45% à l'horizon 2025 et à hauteur d'au moins 80% en 2050. Nous misons sur une gestion de plus en plus efficace de l'énergie. » (BMWI, 2017)²⁷²

²⁷¹ Boulanger, V. (2015). *Transition énergétique* (pp. 12; 23; 29; 89; 92; 171 pages). Les petits matins.

²⁷² BMWI. (2017). *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

L'objectif principal du plan de transition énergétique du *Bundesregierung*, ou le gouvernement fédéral allemand, se résume par un « découplage entre la croissance économique²⁷³ et la production de déchets » (Guria, A., s.d.)²⁷⁴ fossiles²⁷⁵.

a) Deux formes principales de déchets doivent être réduites :

- La réduction des déchets nucléaires jusqu'à la sortie complète de cette forme d'énergie en 2022 (BMW, 2016 : 5)²⁷⁶. Dans le but d'atteindre un avenir énergétique plus soutenable, il y a d'abord une volonté de réduction de cette énergie depuis 1990 avec des centrales nucléaires qui ferment progressivement. S'ensuit, en 1998, l'établissement d'un programme politique énergétique de sortie totale du nucléaire (Criqui, 2016)²⁷⁷. « Suite à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011, l'Allemagne décide d'accélérer l'élimination de ses centrales nucléaires d'ici 2022, en commençant par la fermeture immédiate des huit usines les plus anciennes » (AIE, 2013 : 172)²⁷⁸ « Huit centrales nucléaires totalisant une puissance

²⁷³ Maintenir la croissance économique est explicitement écrit mais pas décrit.

²⁷⁴ « L'un des principaux défis tient au fait que la consommation de matières des économies du G8 et de l'OCDE continue d'augmenter, malgré les améliorations sensibles obtenues en matière de productivité des ressources. Les recommandations formulées portent essentiellement sur les moyens d'accentuer le découplage entre la consommation de matières et la croissance économique par une meilleure intégration des politiques. » (Guria, A. (p. 2). OCDE. Consulté à l'adresse <https://www.oecd.org/fr/env/dechets/48671413.pdf>).

²⁷⁵ L'énergie fossile comprend dans ce mémoire l'énergie nucléaire.

²⁷⁶ BMW. (2016). *Cinquième rapport de suivi « Transition énergétique »* (pp. 5; 17, 31 pages). Berlin : ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMW]. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

²⁷⁷ Criqui, P. (2016). *Une Allemagne sans charbon en 2040? C'est mal parti...* Contrepoints. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <https://www.contrepoints.org/2016/10/08/268193-alle-magne-charbon-2040-cest-mal-parti>

²⁷⁸ AIE. (2013). 2013 *Review Germany* (p. 172, 206 pages). Paris : AIE/OCDE. Consulté à l'adresse http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Germany2013_free.pdf

Source : BMWI, 2016 : 17²⁸¹

- b) Assurer la croissance économique de l'Allemagne, c'est diminuer sa consommation de charbon et de nucléaire en développant la filière des énergies renouvelables (figure 44).

Figure 44. Objectif d'augmentation des renouvelables avec réduction de la consommation énergétique jusqu'en 2050

Source : Morris G., & M. Pehnt, 2015 : 37

Selon la loi EEG, son objectif est d'arriver à 18% de sa consommation finale brute d'énergie provenant des sources d'énergies renouvelables d'ici 2020 (BMWI, 2016 : 6)²⁸². Le

²⁸¹ Le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. (2016) (p. 5). Berlin. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?_blob=publicationFile&v=10

²⁸² BMWI. (2016). Renewable Energy Sources in *Figures* (p.6, 76 pages). *BMWI.de*. Consulté 8 août 2017, à l'adresse

8 juillet 2016, l'Allemagne a adopté une modification à la *Loi sur les énergies renouvelables* (EEG 2017). L'amendement est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2017. Dans cet amendement, l'Allemagne vise à faire parvenir la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale²⁸³ à 30% d'ici 2025, à 45% d'ici 2035 et à atteindre un minimum de 60% d'ici 2050. Dans le secteur de l'électricité brute, on vise une part de 40 à 45% d'ER en 2025, et au moins 80% d'ici 2050 (Figure 45). Dans le secteur du chauffage, on vise une part de 14% en 2020.

Renewable energy – goals of the German government

Renewable energy shares of gross electricity consumption	
2025	40–45 %
2035	55–60 %
2050	at least 80 %
Renewable energy shares of gross final energy consumption	
2020	at least 18 %
2030	30 %
2040	45 %
2050	60 %

Figure 45. Objectifs de développement de la part des renouvelables dans le secteur de l'électricité et dans la consommation finale

Source : (BMWI, 2016 : 6)

c) Par ailleurs, consciente que la décroissance de la production des énergies fossiles ne se fera pas sans une décroissance de la consommation énergétique, (Morris et Penht, 2012 : 34), l'objectif de l'Allemagne est d'abaisser de 20% la consommation d'énergie

http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=13

²⁸³ L'objectif ici est présenté comme la part de l'énergie primaire dans la consommation finale et non comme la part de l'énergie primaire dans le TPES.

primaire d'ici 2020 en comparaison avec 2008, ou 19% entre 2010 et 2020 et de la réduire de moitié à l'horizon 2050 (BMWI, 2017)²⁸⁴ (Figure 46).

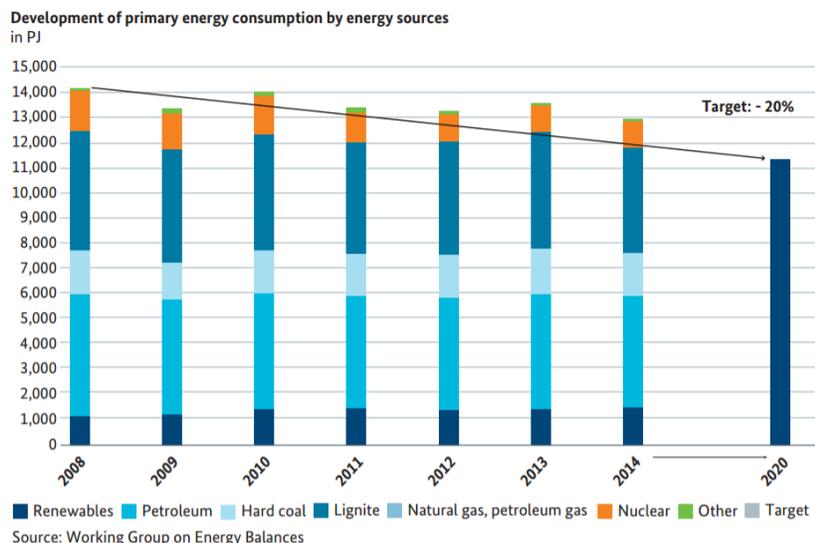


Figure 46. Objectif de réduction de la consommation d'énergie primaire (TPES) de 20% d'ici 2020

Source : BMWI, 2015²⁸⁵

NB : la couleur de la barre de 2020 n'est pas la même que les couleurs utilisées pour les ER. La couleur de 2020 est un mélange de toutes les sources d'énergie.

Ce qui signifie de passer de 14 216 PJ (2008) à 11 383 PJ (2020) (Tableau X).

	2008	2009	2010	2020	2030	2040	2050

²⁸⁴ BMWI. (2017). *Le Plan d'action national pour l'efficacité énergétique : de l'énergie et plus encore*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/la-plate-forme-performance-energetique-et-le-plan-d-action-national.html>

²⁸⁵ BMWI. (2015). *Development of primary energy consumption by energy Sources*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <https://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Infografiken/fortschrittsbericht-energieeffizienz.html>

Primary energy, PJ/yr	14216	13428	14044	11383	9287	8176	7267
Renewable sources of energy	1147	1201	1322	2270	2969	3483	3840
Petroleum	4904	4635	4678	3534	2704	2271	1740
Coal ⁷⁾	3485	3184	3435	1625	935	505	166
Natural gas, petroleum gas, mine gas	3058	2937	3075	3223	2679	1917	1520
Fossil-fuel energy, total	11447	10755	11188	8382	6318	4693	3427
Nuclear power	1622	1472	1534	731	0	0	0

Tableau X. Chiffres tirés du Scénario 2011, A

Source : Nitsch *et al.*, 2012 : 9²⁸⁶.

Au niveau de la consommation d'énergie finale, l'énergie consommée dans le secteur des transports doit diminuer de 10% entre 2008 et 2020. Le chauffage consommé dans les bâtiments doit diminuer de 10% comparé à 2005 (Tableau XI).

²⁸⁶ Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Heide, D., & de Tena, D. et al. (2012). *Long-term scenarios and strategies for the deployment of renewable energies in Germany in view of European and global developments* (p. 9, 40 pages). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung. Consulté à l'adresse http://www.dlr.de/dlr/Portaldaten/1/Resources/documents/2012_1/leitstudie2011_kurz_en_bf.pdf

Figure 3: Energy consumption and energy efficiency indicators of the energy concept

Indicator	Target 2020	Target 2050
Primary energy consumption (compared with 2008)	-20 %	-50 %
Gross electricity consumption (compared with 2008)	-10 %	-25 %
Final energy productivity	2.1 % per annum (2008 – 2050)	
Primary energy consumption in buildings (compared with 2008)	-	in the magnitude of -80 %
Heat consumption in buildings (compared with 2008)	-20 %	-
Final energy consumption in transport (compared with 2005)	-10 %	-40 %

Source: The Energy of the Future: Fourth "Energy Transition" Monitoring Report, updated.

Tableau XI. Objectif d'augmenter la productivité énergétique de 2,1% / an entre 2008 et 2050

Source : BMWI, 2016 : 7²⁸⁷

Cette baisse de la consommation se fera au moyen de l'efficacité énergétique, avec un taux annuel de 2,1% (tableau XI). L'efficacité énergétique est considérée comme un pilier fondamental dans le plan de la transition énergétique allemand. Elle serait d'ailleurs considérée comme « la façon la plus efficace et la moins dispendieuse de lutter contre le changement climatique » (BMWI, 2017)²⁸⁸. Comme le souligne le ministère, « le kilowattheure le plus avantageux et le moins polluant est celui que nous ne consommons pas »

²⁸⁷ The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWI). (2016). *Fifth —Energy Transition” Monitoring Report - 2015 Reporting Year* (p. 7, 156 pages). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse https://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/monitoring-report-2016-summary.pdf?__blob=publicationFile&v=8

²⁸⁸ BMWI (2017). *Germany makes it efficient. BMWI.de*. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-efficiency.html>

(BMWI, 2017)²⁸⁹. Ainsi, pour coupler à la solution de substitution par les ER, l'objectif allemand est de « tirer le meilleur parti » de l'énergie en augmentant sa productivité énergétique à un taux de 2,1% par année. Cela signifie « atteindre le même objectif avec le moins possible d'énergie », donc « plus de croissance en consommant moins d'énergie » (BMWI, 2017)²⁹⁰. Cela signifie d'augmenter la productivité énergétique, c'est-à-dire d'accroître le rapport consommation énergie finale / approvisionnement énergétique primaire de 2,1% par année, en faisant diminuer l'approvisionnement énergétique primaire (BMWI, 2016)²⁹¹ de 20% par année.

À ces objectifs sur le plan énergétique s'ajoutent des objectifs économiques, comme l'indique le Tableau XII. On notera que les uns et les autres ne sont pas hiérarchisés, ni même classés.

²⁸⁹ BMWI (2017). *Le Plan d'action national pour l'efficacité énergétique : de l'énergie et plus encore*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/la-plate-forme-performance-energetique-et-le-plan-d-action-national.html>

²⁹⁰ BMWI (2017). *La campagne d'information « Deutschland macht's effizient »*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/efficacite-energetique.html>

²⁹¹ BMWI (2017). *Germany makes it efficient*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-efficiency.html>

Tableau : Objectifs et cadres de la transition énergétique

Sécurité de l'approvisionnement	Satisfaire en tout temps à la demande énergétique en Allemagne.
Sortie du nucléaire	Fermer les dernières centrales nucléaires d'ici 2022.
Prix abordables compétitivité	Maintenir le caractère abordable de l'énergie et assurer la compétitivité de l'Allemagne.
Development des réseaux	Développer et moderniser les réseaux selon les besoins.
Couplage sectoriel Numérisation	Exploiter les potentiels d'un bon couplage sectoriel et de la numérisation pour réussir la transition énergétique.
Europe Monde	Créer un cadre européen et international fiable pour renforcer la lutte contre le changement climatique, utiliser davantage les énergies renouvelables et améliorer l'efficacité énergétique.
Recherche Innovation	Favoriser les innovations d'avenir pour la restructuration de l'approvisionnement énergétique.
Investissements Croissance Emploi	Maintenir et développer l'emploi en Allemagne et créer les bases d'une prospérité et d'une qualité de vie durables.

Source : tableau réalisé par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 12/2016.

Tableau XII. Objectifs établis dans le cinquième rapport de suivi de la transition énergétique par le BMWI

Source : BMWI, 2016 : 5²⁹²

Ce tableau montre qu'en terme d'objectifs, on a bien celui de a) « maintenir et développer l'emploi en Allemagne, créer les bases d'une prospérité et d'une qualité de vie », répondant aux besoins de la population « en tout temps », assurer la compétitivité allemande en Europe en vendant son énergie à bas prix, et b) réduire les déchets avec la sortie du nucléaire prévue en 2022 et la lutte contre les changements climatiques. Ainsi, nous constatons que les objectifs écologiques (ceux qui nous intéressent) sont mis sur le même plan que les objectifs de politique économique.

²⁹² The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWI). (2016). *Fifth —Energy Transition— Monitoring Report - 2015 Reporting Year* (p. 5, 156 pages). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse https://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/monitoring-report-2016-summary.pdf?__blob=publicationFile&v=8

Pour résumer, l'objectif de découplage entre la croissance économique et la production de déchets montre que les objectifs écologiques sont mis sur le même plan que des objectifs de politique économique, avec quatre objectifs principaux mis en valeur ci-dessous :

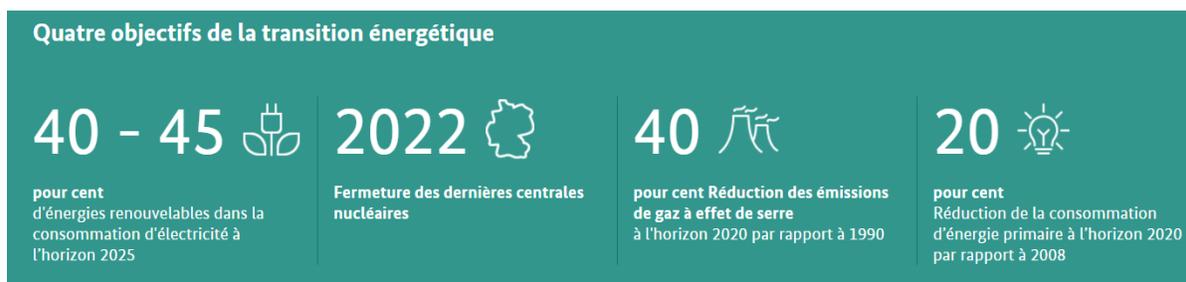


Figure 47. Quatre objectifs de la transition énergétique

Source : BMWI, 2017²⁹³

3.3 Moyens mis en œuvre

« Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux tout en préservant la compétitivité du site industriel allemand, la transition énergétique doit être un succès non seulement écologique mais aussi économique. Pour y parvenir, elle doit être un moteur d'investissements et de modernisation pour une économie innovante et doit contribuer à stimuler la croissance et l'emploi. Le fil conducteur en est le « triangle de la politique énergétique », soit un approvisionnement énergétique sûr, abordable et respectueux de l'environnement (BMWI, 2017)²⁹⁴. »

²⁹³ BMWI. (2017). *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

²⁹⁴ BMWI. (2017). *Investir dans l'avenir de l'Allemagne et de l'Europe - Systématiser la transition*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Textsammlungen/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik.html?cms_artId=257492

Pour atteindre ces différents objectifs, le plan de transition s'appuie sur les deux grandes stratégies dont nous avons discuté dans le chapitre 2 : le développement des ER, d'une part, et des efforts en matière d'efficacité énergétique, d'autre part. Ces stratégies s'appuient notamment sur la transformation des structures de production, le développement du réseau et du stockage de l'électricité, et la production d'énergie flexible en soutien aux ER. D'autre part, la politique énergétique allemande est la « boussole » de cette transition (BMWI, 2017)²⁹⁵.

3.3.1 Les lois au centre de la politique énergétique allemande

« Grâce à la réforme de la Loi sur les énergies renouvelables (EEG), le gouvernement fédéral a jeté les bases du développement des énergies renouvelables. » (BMWI, 2017)²⁹⁶.

Durant la législature et dans le but « de systématiser²⁹⁷ la transition énergétique », un « Agenda Energie en 10 points » réunit les projets « phares » incluant les réformes, projets législatifs et programmes (BMWI, 2017). Parmi ces dix points, on trouve :

²⁹⁵ BMWI. (2017). *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

²⁹⁶ BMWI. (2017). *Investir dans l'avenir de l'Allemagne et de l'Europe - Systématiser la transition*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Textsammlungen/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik.html?cms_artId=257492

²⁹⁷ Systématiser afin de coordonner et planifier la mise en œuvre de la transition énergétique (BMWI. (2017). *Investir dans l'avenir de l'Allemagne et de l'Europe - Systématiser la transition*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Textsammlungen/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik.html?cms_artId=257492)

- (2000) : La *Loi sur les énergies renouvelables (EEG)* établie en 1990, puis « étendue » en 2000, présentée au paragraphe 1.3.5. La réforme de la *loi EEG* s'appuie sur des lois soumises par le gouvernement fédéral et adoptées par le Bundesrat²⁹⁸, suivi du Bundestag²⁹⁹ et sur des spécifications européennes (Gabriel, 2016). Cette loi établit une politique de rachat lucrative pour les producteurs, financée par les consommateurs domestiques « afin d'assurer la rentabilité de leurs investissements, indépendamment du prix de l'électricité sur le marché de gros » (Morris et Penht, 2012 : 110).

« Il se peut qu'aucune autre loi n'ai été autant copiée dans le monde entier que la loi allemande sur les énergies renouvelables (EEG), preuve, s'il en est, de son succès. La loi donne un accès prioritaire sur le réseau aux énergies renouvelables et octroie des compensations suffisantes aux investisseurs dans les énergies renouvelables, afin d'assurer la rentabilité de leurs investissements, indépendamment du prix de l'électricité sur le marché de gros. » (Morris et Penht, 2012 : 118).

- (2014) : Le plan d'action national pour l'efficacité énergétique (Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz, NAPE), adopté le 3 décembre 2014. Les mesures prises en compte dans ce plan obéissent toutes à « un principe commun » : « informer - promouvoir – exiger » afin « d'encourager tous les acteurs de la société à une consommation économe d'énergie » (BMW, 2017)³⁰⁰ à travers, par exemple :

- Une « aide fiscale aux mesures visant à améliorer la performance énergétique des bâtiments résidentiels »;
- Des amortissements pour véhicules électriques à usage professionnel;
- La demande impérative d'audits énergétiques pour les grandes entreprises et l'établissement d'objectifs d'efficacité;

²⁹⁸ Conseil fédéral allemand, dont la présidente est Malu Dreyer du SPD.

²⁹⁹ Assemblée parlementaire allemande.

³⁰⁰ BMW. (2017). *Le Plan d'action national pour l'efficacité énergétique : de l'énergie et plus encore*. BMW.de. Consulté le 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/la-plate-forme-performance-energetique-et-le-plan-d-action-national.html>

- L'établissement de normes applicables aux nouvelles installations et constructions;
- Un plan d'avancement.

- (2014) : *Loi sur les économies d'énergie* (EnEG) et décret sur les économies d'énergie (EnEV) (BMWI, 2017)³⁰¹.

L'ordonnance sur les économies d'énergie (EnEV) concerne la recherche de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. Plus précisément, elle comporte des objectifs en matière de rénovation (isolation des anciens bâtiments et, pour les nouveaux, un objectif de haute efficacité énergétique grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables. Pour les maisons déjà construites, l'objectif de l'Allemagne est d'accroître « le taux annuel de rénovation de un pour cent à deux pour cent » (Morris & Penht, 2012 : 144)³⁰². Les objectifs de la dernière révision de l'EnEV 2014 sont des objectifs de standardisation et de performance (BMWI, s.d.)³⁰³.

Aussi, puisqu'« en Allemagne, les bâtiments absorbent environ 40 pour cent de l'énergie, dont une grande partie pour le chauffage » (Morris & Penht, 2012 : 143) et que le pétrole et le gaz continuent d'y dominer le secteur (représentant ensemble plus des trois quarts de ce marché) (Morris et Penht, 2012), le gouvernement a mis en place la *Loi sur la chaleur issue des énergies renouvelables* (EEWärmeG), visant à accroître la part des ER dans le domaine de la

³⁰¹ « La *Loi sur les économies d'énergie* (EnEG) constitue la base d'habilitation du décret sur les économies d'énergie (EnEV) » (BMWI. (2017). *Progression de la transition énergétique dans le secteur des bâtiments*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/batiment.html>)

³⁰² Les rénovations pour l'ensemble des bâtiments prendraient 100 ans avec un taux de 1%. Avec 2%, toutes ces constructions prendraient 40 ans.

³⁰³ BMWI. (2017). *Progression de la transition énergétique dans le secteur des bâtiments*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/batiment.html>

chaleur à 14 pour cent d'ici 2020 (BMW, s.d.)³⁰⁴. Toujours dans le domaine du bâtiment, un programme d'incitation offre des financements pour les systèmes de chauffage renouvelables (capteurs solaires thermiques, chauffage moderne à partir de biomasse et pompes à chaleur efficace).

- (8 juillet 2016), *Loi sur le développement du marché de l'électricité et Loi sur la numérisation de la transition énergétique*, adoptées par le Bundestag³⁰⁵ et le Bundesrat³⁰⁶.

Ces lois « posent les jalons » du pilotage intelligent d'un « processus de transformation » du secteur électrique par l'intégration optimale « et continue » des ER. Dans le but de se tourner vers un marché de **capacités nécessaires** pour répondre à la demande des clients, « ni plus, ni moins », ces lois mettent en œuvre le marché de l'électricité 2.0. (BMW, s.d.)³⁰⁷.

« Le « marché de l'électricité 2.0 » désigne un marché de l'électricité développé. Cela veut dire que les mécanismes existants du marché de l'électricité sont conservés et renforcés afin que la sécurité de l'approvisionnement continue d'être garantie. Un marché de capacité supplémentaire – c'est-à-dire un marché supplémentaire qui rémunère séparément le maintien de capacité électrique – est inutile. Avec le marché de l'électricité 2.0, les capacités nécessaires se refinancent par le biais des mécanismes de marché existants. » (BMW, s.d.)³⁰⁸.

³⁰⁴ *Idem*

³⁰⁵ Assemblée parlementaire allemande.

³⁰⁶ Conseil fédéral allemand dont la présidente est actuellement Malu Dreyer, du SPD.

³⁰⁷ BMW. (2017). *Marché de l'électricité de demain*. *BMW.de*. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Dossier/marche-de-lectricite-de-demain.html>

³⁰⁸ « Deux mécanismes fondamentaux sont particulièrement importants pour le marché de l'électricité 2.0 : premièrement, les prix de l'électricité doivent continuer d'être fixés librement sur le marché de l'électricité et deuxièmement, les fournisseurs de courant sont tenus de remplir leurs obligations de livraison. En outre, d'autres mesures contribuent à assouplir le marché de l'électricité et ainsi à permettre l'intégration, à un coût abordable,

Le marché de l'électricité 2.0 se caractérise par une « libre fixation du prix de l'électricité sur le marché de gros » et par une obligation, de la part des fournisseurs, de « livrer » l'électricité (BMWI, s.d.). Par ailleurs, à la différence du marché spot français, l'Allemagne a choisi de développer une stratégie de « capacités nécessaires³⁰⁹ » et non un marché de capacité. Ce qui signifie qu'au lieu de rémunérer les exploitants qui mettent en service de l'énergie pour « équilibrer le réseau » (Boulangier, V., 2015), le plan allemand met en place une capacité de réserve de 2 GW permettant de répondre à la demande par mesure de sécurité, en cas de pénuries ou de black-out.

Ce marché 2.0 a pour but d'établir la libre concurrence « de la production, de la demande flexible et du stockage » (BMWI, s.d.)³¹⁰. Ce nouveau positionnement demandera donc une énergie « flexible » et l'interconnexion entre les producteurs et les consommateurs. *La loi sur la numérisation* permet d'ouvrir les portes aux « systèmes de mesure intelligents » (Gabriel, 2016)³¹¹, rendant possible ce nouveau marché interconnecté.

- (29 juin 2017) *Loi sur l'autoconsommation des énergies* : adoptée par le Bundestag et pas encore adoptée par le Bundesrat.

des énergies renouvelables. » BMWI. *Que signifie « marché de l'électricité 2.0? »* BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse

<http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/FAQ/marche-de-l-ectricite-2-0/01-faq-marche-de-l-ectricite-2-0.html>)

³⁰⁹ <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2016/20160624-gabriel-bundestag-verabschiedet-reform-strommarkt.html>

³¹⁰ Voir note 242.

³¹¹ Sigmar Gabriel. (2016). *Le Bundestag adopte une vaste réforme du marché de l'électricité et l'adapte à la transition énergétique*. Consulté à l'adresse

<http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2016/20160624-gabriel-bundestag-verabschiedet-reform-strommarkt.html>

Cette loi donne la possibilité à des propriétaires de fournir l'électricité autoproduite (par exemple à l'aide de panneaux solaires sur le toit) à des locataires. Au regard de la loi EEG, celle dont il est question ici va également permettre au propriétaire de toucher une prime (BMWI, 2017)³¹².

Enfin, cet Agenda en 10 points est revu lors des assemblées entre la Fédération et les Länder :

« La Fédération et les Länder se concertent en permanence sur la mise en œuvre de la transition énergétique. Une réunion semestrielle a lieu entre la Chancelière, le ministre fédéral de l'Économie et les ministres-présidents des länder afin de faire le point sur l'état d'avancement de la transition énergétique » (BMWI, s.d.)³¹³.

3.3.2 Comment mettre en œuvre le déploiement des renouvelables?

1.1.1.1 Miser sur le déploiement de l'éolien et du solaire photovoltaïque

La stratégie de la transition énergétique allemande repose sur l'électrification des secteurs (voir « couplage des secteurs » paragraphe 3.3.3.2). Pour ce faire, la loi EEG préconise particulièrement le développement de l'éolien hors-terre, à hauteur de 6 500MW de capacité

³¹² BMWI. (2017). *Le secrétaire d'État Uwe Beckmeyer se félicite de l'adoption de la loi relative à l'autoconsommation collective d'électricité*. Consulté à l'adresse

<http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170630-beckmeyer-mieterstromgesetz-im-bundestag-verabschiedet.html>

³¹³ BMWI. (s.d.). *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

installée d'ici 2020, de l'éolien terrestre (2 800 MW/an entre 2017 et 2019) et des panneaux photovoltaïques (2 500 MW/an) (BMWI, 2016)³¹⁴ (Tableau XIII).

Concernant la production de chaleur, l'Allemagne étant le plus grand producteur de bois de l'UE, la biomasse, avec une vitesse de développement de 150 MW/an, pourrait représenter en 2020 jusqu'à la moitié de l'ensemble des énergies renouvelables (Morris et Penht, 2012 : 215).

Onshore wind energy	2,800 MW Annual gross newbuild in 2017–2019	2,900 MW Annual gross newbuild from 2020
Offshore wind energy	Increase in installed capacity to 6,500 MW in 2020	Increase in installed capacity to 15,000 MW in 2030
Solar energy	2,500 MW Annual gross newbuild	
Biomass	150 MW Annual gross newbuild in 2017–2019	200 MW Annual gross newbuild in 2020–2022

Tableau XIII. Couloir de déploiement des capacités installées des renouvelables

Source : BMWI, 2017³¹⁵

1.1.1.2 Développer la flexibilité et le stockage de l'électricité

Pour adapter la production d'électricité à la demande, « un certain nombre d'options de stockage est à l'étude » (Morris et Pehnt, 2012 : 77).

Pour gérer les excédents, on utiliserait :

³¹⁴ BMWI. (2016), *Renewable Energy Sources in Figures* (p. 7). Berlin : BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=13

³¹⁵ Voir note 249.

- le pompage-turbinage (STEP), pour faire remonter l'eau du barrage dans le réservoir en amont grâce à l'énergie des ER;
- les volants d'inertie qui permettent de stocker l'énergie sous forme mécanique en faisant tourner un volant;
- les batteries;
- le stockage sous forme de gaz grâce au procédé « Power-to-Gas », ou P2G, qui transforme l'électricité sous forme de gaz CH₄ stockable³¹⁶. « Dans le futur, elle peut être une forme de stockage pour l'électricité renouvelable et une source d'énergie pour la mobilité ». (BMW, s.d.)³¹⁷

Mais le programme de transition énergétique mise pour l'instant davantage sur la flexibilité du réseau que sur le stockage. D'abord, car il apparaît que « le système énergétique allemand dispose déjà d'un large potentiel de flexibilité qui n'est pas suffisamment valorisé, notamment en matière de gestion de la demande » (Morris et Penht, 2012 : 104). D'autre part, certains observateurs soulignent que le développement du stockage ne forcerait pas l'Allemagne à sortir des centrales peu flexibles telles que les centrales à charbon, à l'avantage des centrales à gaz, beaucoup plus flexibles, c'est-à-dire « plus réactives » pour équilibrer le réseau en cas de manque d'énergie.

1.1.1.3 Développer la flexibilité / charge de base en réponse à l'intermittence des ER

³¹⁶ Obtenu par électrolyse de l'eau qui donne de l'hydrogène; celui-ci sera mélangé à du CO₂ pour obtenir le gaz méthane (CH₄).

³¹⁷ BMW. *Key factors for a secure energy supply*. BMW.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/EN/Dossier/conventional-energy-sources.html>

D'après l'Energiewende, il ne s'agit pas d'avoir une charge de base³¹⁸ telle que celle des centrales à charbon ou les centrales nucléaires. Il s'agit d'avoir un apport énergétique flexible, c'est-à-dire capable de s'adapter rapidement aux variations de la demande. Pour répondre à ce besoin de flexibilité, et dans une logique de gestion du réseau, la stratégie est de remplacer les centrales peu flexibles (charbon et nucléaires) par celles au gaz naturel plus adaptées pour seconder l'intermittence de l'énergie éolienne et solaire (Morris et Penht, 2015). Les centrales à gaz sont considérées plus flexibles dans le sens où « elles sont capables de démarrer en dix à trente minutes, alors qu'il faut entre une et dix heures à une centrale à charbon » (Boulangier, 2015: 23). Par ailleurs, il paraîtrait que ce carburant est moins polluant. En ce sens, « l'Allemagne prévoit d'utiliser le gaz naturel comme carburant de transition, pour le remplacer un jour par du biogaz et de l'hydrogène durables fabriqués à partir des excédents éolien et solaire ».

Cependant, puisqu'« au rythme actuel de notre consommation, notre énergie ne pourra provenir à 100% de sources renouvelables, l'efficacité énergétique³¹⁹ n'est pas un luxe, elle est indispensable. » (Morris et Penht, 2012 : 42).

3.3.3 Comment rendre le système énergétique plus efficace?

Comment augmenter la productivité du système énergétique allemand? La manière la plus efficace d'y arriver serait de réduire principalement

³¹⁸ « Les charges de base des centrales électriques sont celles qui couvrent la quantité minimale d'électricité nécessaire aux besoins du pays 24 heures sur 24 » (Morris et Penht, 2012 : 343).

³¹⁹ L'efficacité énergétique signifie créer la même valeur avec moins d'énergie au départ. Elle est mesurée par l'intensité énergétique, en joule (ou tep) par dollar investi. Plus l'intensité énergétique est faible, meilleure est la situation écologique du pays.

- a) Les pertes lors de l'utilisation de l'énergie finale et de l'énergie utilisée
- b) Les pertes lors de la conversion (Figure 48) de l'énergie primaire à l'énergie finale (pertes de conversion dans la production d'électricité, processus de conversion dans les raffineries, pertes d'énergie dues au réseau) (BMW, 2016 : 7)³²⁰ représentant près du quart de l'énergie primaire :

³²⁰ BMW. (2016). *Green Paper on Energy Efficiency* (p. 7). Berlin: BMW. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/EN/Publikationen/green-paper-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=3

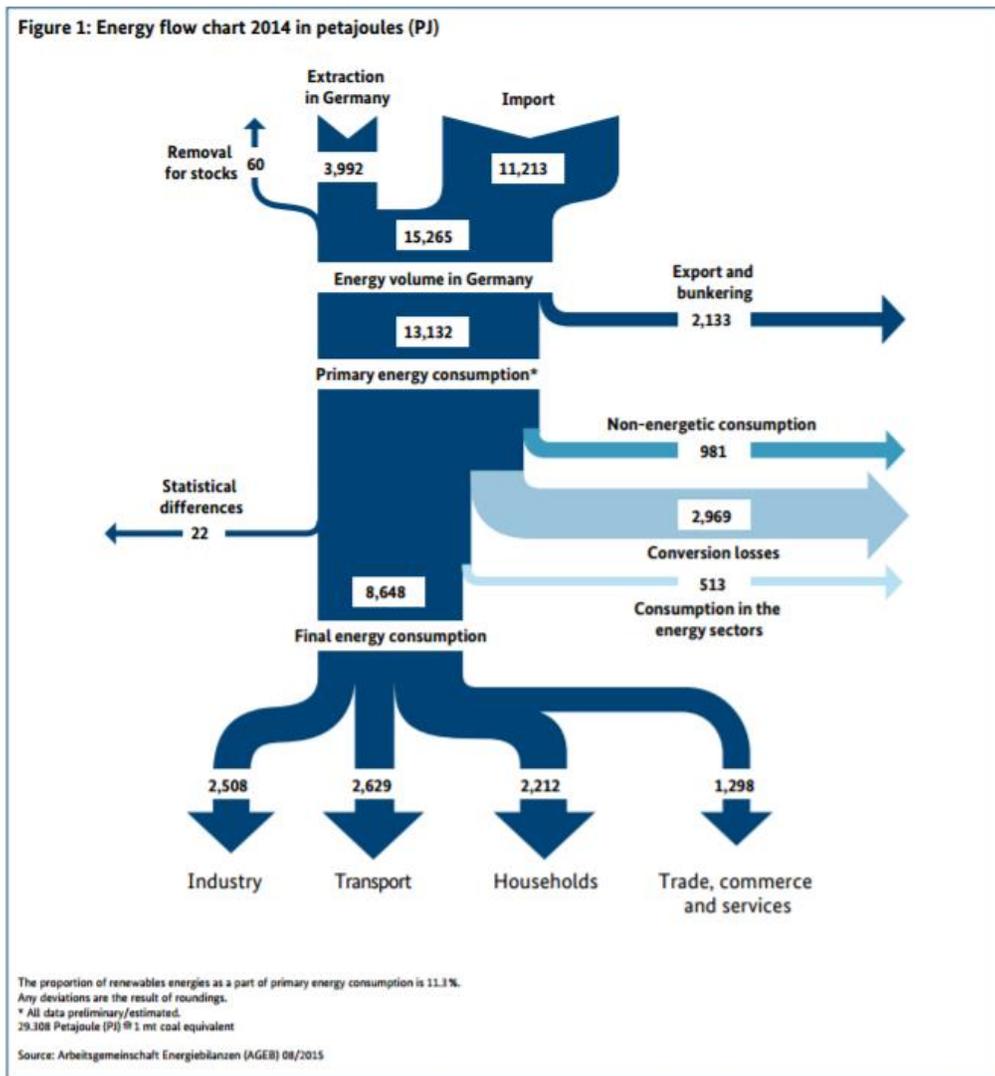


Figure 48. Diagramme d'écoulement d'énergie [PJ] en 2014

Source : BMWI, 2016 : 8³²¹

La Figure 48 présente le flux énergétique de l'Allemagne en 2014, depuis son approvisionnement énergétique (incluant les importations, l'extraction depuis le sol allemand moins les exportations) de 15 265 PJ, son TPES (l'approvisionnement énergétique moins les

³²¹ Voir note 253.

exportations) de 13 132 PJ, dont 4 443 PJ sont consommés pour transformer l'énergie primaire en 8 648 PJ d'énergie finale répartie dans le secteur industriel, des transports, résidentiel, et commercial. Les pertes de conversion et la consommation d'énergie dans ce secteur représentent la consommation énergétique pour le fonctionnement des centrales électriques, la consommation de carburants et d'électricité pour l'exploitation des raffineries, les pertes lors de la transmission dans les lignes électriques ou du transport des carburants.

De ce fait, réduire cette consommation en amont du flux énergétique permettrait de fournir autant d'énergie finale, avec un rendement plus important, dont l'objectif est d'atteindre 2,1% par année.

Comment l'Allemagne met-elle en œuvre l'efficacité énergétique?

1.1.1.4 Technologies efficaces

Le principal moyen mis en œuvre est d'investir dans des technologies efficaces. Par exemple, en améliorant l'efficacité même des centrales dans le secteur de l'énergie, tel le système de cogénération électricité et chaleur CHP (combined heat and power) qui représente une grande opportunité d'efficacité (John, Nadel & Siddiq Kahn, 2012)³²², ou bien grâce à la récupération de la chaleur perdue dans le processus de transformation. Plusieurs projets concrets sont proposés, comme celui lié à la réduction de la consommation énergétique du secteur résidentiel par des produits plus isolants et « classés » plus efficaces par des normes standards ou encore des moteurs électriques avec un rendement plus élevé et des systèmes d'éclairage LED.

³²² John, A., Nadel, S., & Siddiq Kahn, A. (2012). *The long-Term Energy Efficiency Potential: What the evidence suggests* (pp.53-55). Washington: American council for an energy-efficient economy. Consulté à l'adresse https://www.garrisoninstitute.org/downloads/ecology/cmb/Laitner_Long-Term_E_E_Potential.pdf

« Le 6^{ème} programme de recherche dans le domaine de l'énergie fixe les lignes directrices et les priorités actuelles de la politique allemande de promotion des technologies énergétiques innovantes » (BMW, s.d.)³²³.

1.1.1.5 Couplage des secteurs

« L'énergie est consommée dans trois secteurs d'utilisation finale : le bâtiment (pour le chauffage et le refroidissement), le transport et l'industrie. Le secteur de l'électricité est également souvent inclus dans cette liste du fait de l'importance de l'électricité. Mettre en lien ces trois secteurs constituera une étape décisive pour la réussite de la transition énergétique. Cette étape est désignée sous le nom de «couplage des secteurs» » (Morris et Penht, 2012 : 101).

Comme le secteur de l'électricité à partir de renouvelables (éoliens et panneaux solaires) serait le secteur le plus facilement « substituable » aux énergies fossiles (voir paragraphe 1.3.3.1), la politique de transition énergétique allemande définit le couplage des secteurs (Figure 51) comme l'électrification des secteurs en question, c'est-à-dire l'électrification des transports (trains et tramways électriques, voitures électriques) et la production de chaleur à partir d'électricité (chauffage et refroidissement grâce à des pompes à chaleur dans les secteurs industriels, commerciaux et résidentiels) (BMW, 2016 : 25)³²⁴. Ainsi, le couplage sectoriel vise à davantage utiliser l'électricité produite à partir des énergies renouvelables plutôt que les combustibles fossiles (BMW, s.d.)³²⁵.

³²³ BMW. *6ème programme de recherche du gouvernement fédéral dans le domaine de l'énergie*. BMW.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/recherche-pour-un-approvisionnement-energetique-respectueux-de-l-environnement-fiable-et-abordable.html>

³²⁴ Voir note 253.

³²⁵ BMW. *Poser les jalons d'un approvisionnement en électricité viable : Processus de discussion « Électricité 2030 »*. BMW.de. Consulté 8 août 2017, à l'adresse

Par ailleurs, en intégrant l'efficacité énergétique au couplage sectoriel (SC dans la figure ci-dessous) et à l'utilisation des ER, on devrait arriver à obtenir une diminution de l'énergie consommée pour le secteur des transports (carburant), de l'électricité (pour usages résidentiels et procédés industriels) et de la chaleur (mazout, gaz naturel) et ainsi remplacer les énergies fossiles plus facilement.

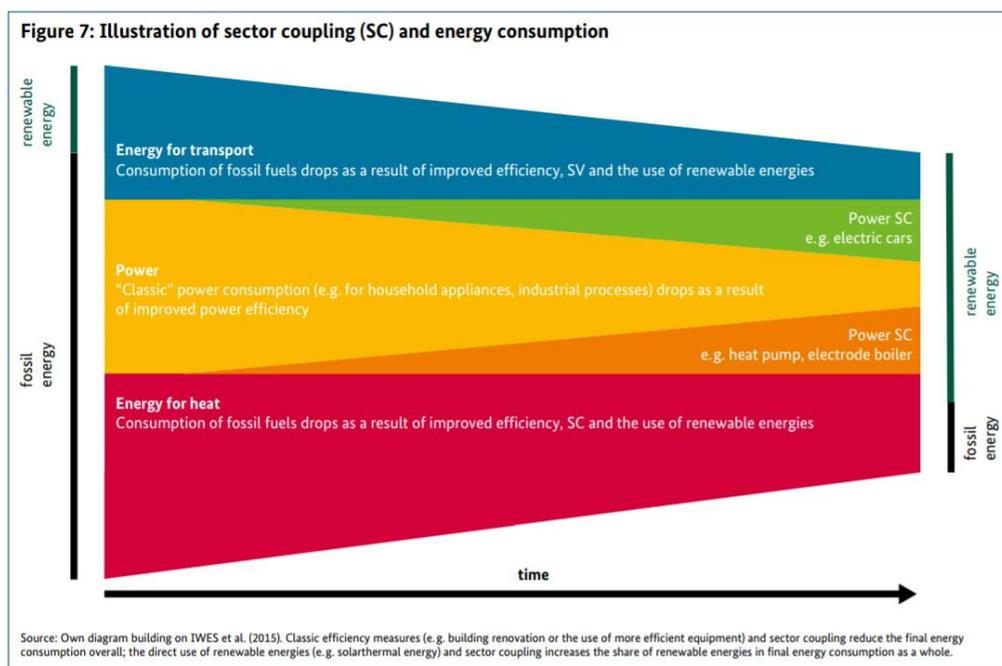


Figure 49. Couplage sectoriel

Source: BMWI, 2016³²⁶

Les compteurs intelligents pourraient constituer « un moyen de couplage sectoriel. Par exemple, les compteurs intelligents permettraient de savoir quand on peut charger les véhicules, lorsque la demande en électricité diminue, généralement pendant la nuit » (Morris

<http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/strommarkt-der-zukunft-strom-2030.html>

³²⁶ Voir note 253.

et Penht, 2012). L'industrie énergétique, le secteur des transports et l'industrie maritime seront aussi plus étroitement liés en matière de technologie et d'innovation (BMW, 2017)³²⁷.

1.1.1.6 Décentralisation du système

Sur le plan fonctionnel des systèmes de production, le rapport établi par la Fondation Heinrich Böll montre un objectif de « transformation profonde de l'économie et de la société » (Deshaie, 2014) avec l'arrivée du marché de l'électricité 2.0. En effet, l'objectif allemand serait de passer d'un système de production « centralisé et contrôlé par de grandes sociétés capitalistiques » à un système « très décentralisé de petites structures de production » dont les citoyens pourraient être les gestionnaires (Deshaie, 2014). Contrairement à des systèmes centralisés tels que les centrales nucléaires, peu flexibles³²⁸ (Morris et Penht, 2012 : 85), et nécessitant une production énergétique quasiment sans arrêt³²⁹ un approvisionnement en énergie renouvelable décentralisé est « une approche beaucoup plus douce, avec un impact réduit sur l'environnement » (Morris et Penht, 2012 : 80). Un réseau décentralisé « reposant sur une multitude d'unités de production » est plus sécuritaire « qu'un réseau centralisé autour de grosses centrales » car si une centrale tombe en panne par exemple, ce serait d'immenses

³²⁷ BMW. (2017). *Coup d'envoi de l'initiative de soutien « transition énergétique dans les transports »*. Consulté à l'adresse

<http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170227-startschuss-fuer-foerderinitiative-energiewende-im-verkehr.html>

³²⁸ « Il n'est pas facile pour les centrales nucléaires, en particulier, d'augmenter ou de ralentir leur production en l'espace de quelques heures, et les tentatives d'y parvenir sont néfastes pour le résultat financier, à deux égards : d'abord, les coûts fixes restent inchangés, seuls les coûts de carburant baissent légèrement, ce qui entraîne la hausse du coût de l'énergie produite; deuxièmement, les centrales elles-mêmes subissent des dommages de fatigue thermique, risquant de raccourcir leur durée de vie moyenne. » (Morris et Penht, 2012 :86).

³²⁹ Un système de chauffage « produisant de la chaleur même la nuit » a été établi dans le secteur résidentiel dans le but d'éviter de ralentir la production énergétique (Morris et Penht, 2016,

quantités d'énergie (un réacteur nucléaire a une puissance comprise entre 900 à 1500 MW) qui soudainement feraient défaut, contrairement à une éolienne, où seulement 2 à 5 MW seraient coupés (Boulangier, 2015 : 92). Par ailleurs, nous n'aurions plus besoin d'autant de capacité installée puisque l'offre et la demande s'ajusteraient grâce à l'interconnexion entre les consommateurs et les producteurs (voir *Loi sur le développement du marché de l'électricité* et *Loi sur la numérisation de la transition énergétique*, paragraphe 3.3.1). En ce sens, passer par un approvisionnement décentralisé serait beaucoup plus efficace que la distribution centralisée par des énergies de charge de base peu flexibles, car le fonctionnement de ces dernières est considéré comme « couper le beurre avec une tronçonneuse » (Hermann Schee, cité par Morris et Penht, 2012 : 80).

Enfin, dans une mesure d'efficacité et à l'heure de la « numérisation » du secteur énergétique, les « réseaux intelligents » faciliteront une adaptation rapide entre la demande énergétique et l'offre en énergie renouvelable.

3.3.4 Avantages économiques espérés du plan de transition

La politique économique de l'Energiewende est de promouvoir la croissance économique et l'emploi en renforçant « la base de la croissance en Europe » (BMWI, s.d.)³³⁰ :

« Un développement économique durable en Europe est une condition primordiale pour la croissance et l'emploi en Allemagne. Une croissance économique durable et équilibrée, qui permet la participation économique et sociale de chaque citoyen, peut aussi améliorer la situation sociale des citoyens de l'Union européenne sur le long terme. Pour améliorer durablement le potentiel de croissance européen, le gouvernement fédéral mise sur la combinaison de trois

³³⁰ BMWI. *Renforcer la base de la croissance en Europe*. BMWI.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik-04.html>

aspects : des investissements accélérés, des réformes structurelles ambitieuses et une consolidation propice à la croissance » (BMW, s.d.)³³¹.

Dans l'optique de mettre en œuvre les deux grandes stratégies sur lesquelles s'appuie le plan de transition allemand et présentées plus haut, tout en restant compétitif sur le plan économique et en soutenant la croissance, ledit plan de transition choisit la libre fixation des prix sur le marché de gros (ou marché spot) de l'énergie. Dans une perspective d'électrification des secteurs par les ER, c'est surtout le marché spot de l'électricité 2.0 qui doit être rentable. On parie donc a) que les ER pourraient offrir des prix compétitifs en matière d'approvisionnement en électricité, b) sur l'accroissement des exportations c) sur la réduction des importations et d) sur la stimulation de la recherche et l'emploi

- Augmenter les exportations grâce à des prix compétitifs sur le marché européen de l'énergie.

En Allemagne, il existe deux façons de vendre l'électricité. Soit elle est vendue par les producteurs d'électricité aux fournisseurs par un contrat à long terme, soit on négocie le prix sur un marché spot qui donne des prix d'électricité, prix spot, en temps réel ou sur un marché à « jour-1 »; ce dernier peut être intéressant pour la vente des ER puisque celles-ci dépendent d'une météo établie un jour à l'avance.

Le principe de vente est le suivant : les centrales conventionnelles sont « classées » en fonction du coût de leur carburant principalement. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, le prix du charbon et du nucléaire étant moindre que celui du gaz (en l'occurrence, le prix de construction des centrales à charbon et nucléaires est plus élevé que celui des centrales à gaz), l'électricité produite par ces centrales est vendue moins cher sur le marché spot, et donc est classée en premier, ce qui lui permet de « fournir un nombre élevé d'heures à pleine charge »

³³¹ Idem.

(Morris et Penht, 2012). L'électricité produite par les ER n'est pas classée en fonction de son prix car, avec la loi EEG, celle-ci est prioritaire sur le réseau (Morris et Penht, 2012). Pour les ER, les moins chères passent devant les autres, ce qui permet de faire baisser les prix.

Le premier argument économique utilisé est que les énergies des technologies vertes (vent, lumière, chaleur, eau) sont gratuites, ce qui implique que les prix restent stables à long terme. Par ailleurs, basé sur un principe d'offre et de demande ajustée, l'accroissement de la production d'électricité depuis les secteurs éoliens et photovoltaïques, corrélé à des innovations technologiques, permet la baisse de leur coût de fabrication³³² (Figure 50). Par exemple, l'énergie solaire en Allemagne connaît une baisse du prix de 74% depuis 2006. Cela permet d'augmenter l'offre et, lorsque la demande est stable, voire en diminution pendant les temps plus chauds, cela assure des prix compétitifs (Energy Market Price, 2017)³³³ et des prix spot parmi les plus bas en Europe (Lauer, 2016)³³⁴.

³³² « Le photovoltaïque a alors connu une explosion d'investissements, au moment où les progrès industriels permettaient d'abaisser le coût de fabrication des cellules » (Deshaie, 2014 : 2).

³³³ Energy Market Price. (2017). *Quotidien (17.03.2017): Le prix spot de l'électricité en Allemagne baisse de 17% vu les prévisions d'énergie éolienne accrue*. *Energymarketprice.com*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.energymarketprice.com/energy-news/quotidien-17-03-2017-le-prix-spot-de-l-electricite-en-allemande-baisse-de-17-vu-les-previsions-d-energie-eolienne-accrue>

³³⁴ Lauer, H. (2016). *Le paysage énergétique allemand en 2015*. Société Française d'Énergie Nucléaire [SFEN]. Consulté à l'adresse <http://www.sfen.org/en/node/1475>

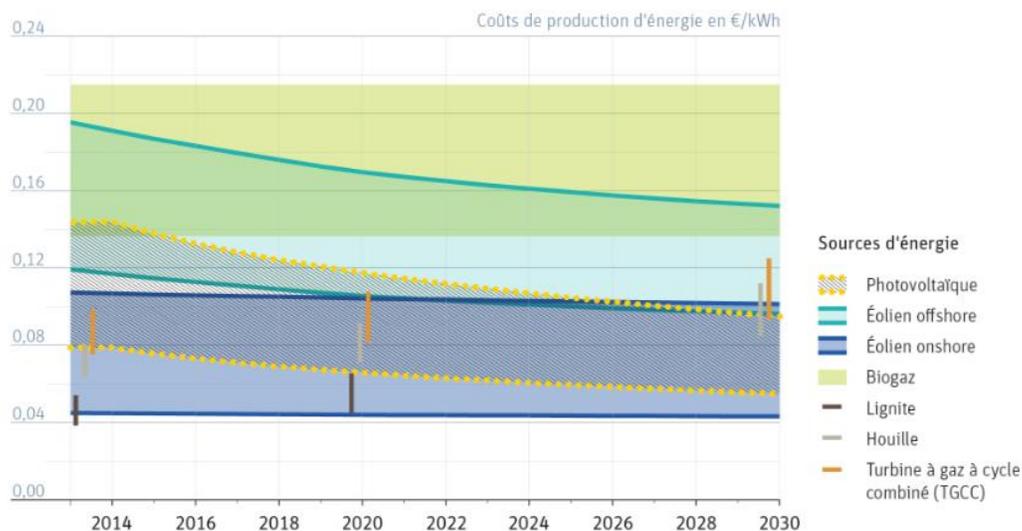


Figure 50. Prévision des coûts de production jusqu'en 2030

Source : Morris et Penht, 2012 : 13

Cependant, le défi des prix compétitifs par rapport au prix des énergies fossiles n'est pas une bataille résolue. Même si l'Allemagne paie le prix du marché pour l'énergie fossile en provenance de la Russie, la chute de ses prix peut rendre moins attractifs les investissements réalisés dans les énergies renouvelables. D'après l'Energiewende, ce sont « les gouvernements qui doivent garantir que la transition vers une énergie propre se poursuit même au moment où l'abandon des ressources fossiles tire le prix de celles-ci vers le bas. » (Morris et Penht, 2012: 24)

- Réduire les exportations

D'autre part, l'Allemagne voudrait produire son propre gaz renouvelable pour réduire les importations et « sécuriser l'approvisionnement » (Morris et Penht, 2012 : 24). Réduire les importations signifierait, d'un point de vue économique, éviter la « fluctuation imprévisible des prix des combustibles et à la politique étrangère » (Morris et Penht, 2012 : 23).

- Stimulation de la recherche et de l'emploi

La transition énergétique est considérée comme une opportunité de stimuler la croissance économique car elle ouvrirait de nouveaux emplois. Le marché des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique devrait offrir un emploi à 355 000 personnes (Figure 51).

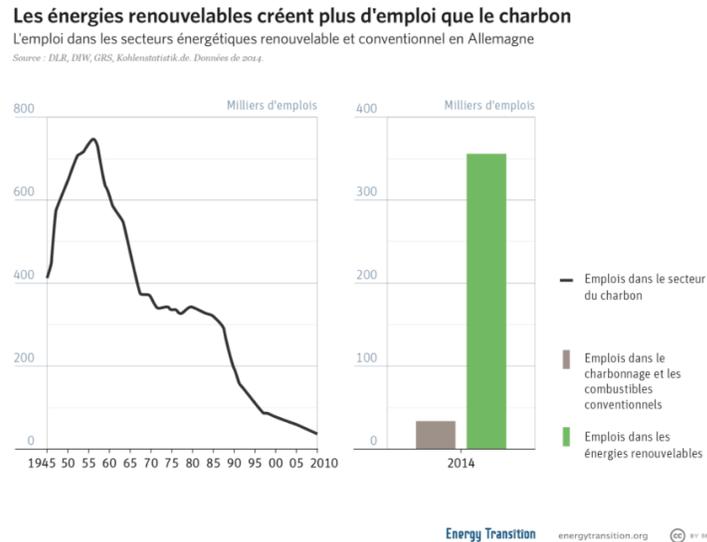


Figure 51. Les énergies renouvelables créent plus d'emploi que le charbon.

Source : Morris et Penht, 2012 : 305

Par exemple, dans le secteur du photovoltaïque, on estime que son activité, représentée par 10 000 entreprises « dont 200 sont des producteurs de composants (modules, cellules, onduleurs, etc.) » (Association Hespul, 2014)³³⁵, génère environ 133 000 emplois. C'est ce qui lui assure un marché « où l'installation d'un système photovoltaïque est la moins chère au monde » (Association Hespul, 2014).

³³⁵ Association Hespul. (2014). *Photovoltaïque.info | Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité | L'Allemagne*. Photovoltaïque.info. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.photovoltaïque.info/L-Allemagne.html>

3.4 Premiers résultats de l'Energiewende

Après avoir présenté les objectifs et les moyens mis en œuvre de l'« Energiewende », voyons ce qu'il en est de ses premiers résultats, sur le plan économique d'une part, sur les plans énergétique et écologique, d'autre part, par rapport à 1990 (année de référence au Protocole de Kyoto). Nous tenterons de donner des résultats intéressants sur la période 2008 (année de référence de l'Energiewende) jusqu'en 2017, bien qu'il soit difficile de se prononcer d'après cet horizon temporel trop court (inférieur à 10 ans) et biaisé par la récente crise économique de 2007-2012.

3.4.1 L'économie allemande depuis le lancement de l'« Energiewende ».

D'après la Figure 52, depuis les années 1990, le taux de croissance annuel est globalement positif situé entre -1 et 2%, avec une baisse de plus de 4% en 2009, durant la récente crise économique (Ieconomics Inc., 2017)³³⁶. D'après la courbe en pointillé, il aurait tendance à légèrement diminuer en Allemagne (courbe en pointillé décroissante). Cependant, sur les 3 dernières années, on observerait une tendance à la hausse, avec un taux de croissance annuel

³³⁶ Ieconomics Inc. (2017). *Germany GDP Growth Rate Forecast*. *Tradingeconomics.com*. Consulté 17 septembre 2017, à l'adresse <https://tradingeconomics.com/germany/gdp-growth/forecast>

du PIB de +1,7% sur deux années consécutives, en 2015 et 2016 (World Bank Group, 2017)³³⁷.

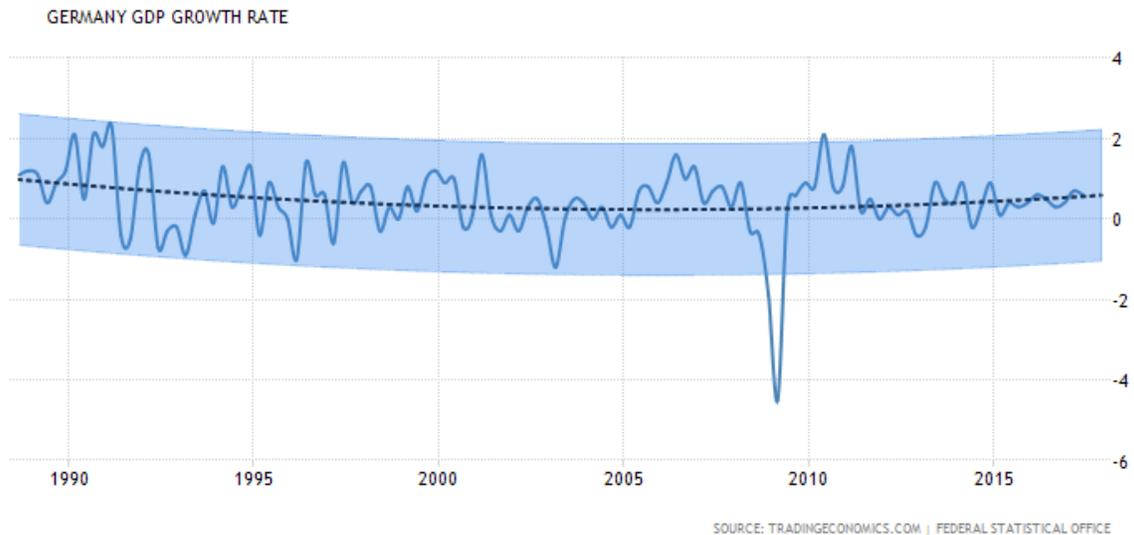


Figure 52. Taux de croissance économique annuel [%], entre 1990 et 2017.

Source : (Ieconomics inc, 2017)³³⁸

D'après l'équation du PIB donnée au paragraphe 1.3.2.1.1, dont on rappelle l'équation ci-dessous :

$$PIB [\$] = C + G + I + (X - M)$$

Le PIB dépend de :

³³⁷ The World Bank Group. (2017). *Germany* | Data. Data.worldbank.org. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://data.worldbank.org/country/germany?view=chart>

³³⁸ Ieconomics Inc. (2017). *Germany GDP Growth Rate Forecast*. Tradingeconomics.com. Consulté 17 septembre 2017, à l'adresse <https://tradingeconomics.com/germany/gdp-growth/forecast>

C : les dépenses de consommation; G : les dépenses gouvernementales; I : les investissements privés et publics; X : les exportations; M : les importations.

Nous n'allons pas faire une analyse complète pour expliquer la croissance économique allemande mais, d'après notre revue de littérature, celui-ci serait en hausse du

1/ À des dépenses gouvernementales d'environ 20 milliards d'euro représentant une croissance de +4,2% (Deharo, 2017)³³⁹ par rapport à 2015, ainsi que des dépenses de consommation lié à la croissance du nombre de réfugiés sur le territoire en 2016.

2/ Cette croissance économique est soutenue par un taux de chômage très faible et **une croissance dans les emplois créés dans le secteur des renouvelables**. L'évolution des emplois dans la filière des énergies renouvelables a atteint un pic en 2012 avec 400 000 employés, mais le taux de croissance dans la création de nouveaux emplois est négatif depuis 2012. En 2014, il y a bien eu 355 400 emplois dans les ER, mais seulement 330 000 en 2015 (BMW, 2016)³⁴⁰. Il n'en reste pas moins que « le nombre de personnes employées dans le secteur des renouvelables en Allemagne est deux fois supérieur à celui dans tous les autres secteurs de l'énergie réunis » (Morris et Penht, 2012 : 303). Cependant, ce taux de chômage très faible est lié à une politique de flexibilité dans l'emploi, c'est-à-dire une baisse dans la durée d'heures et des salaires très bas (Le Boucher, 2012)³⁴¹. Ce qui ne résout pas le problème de pauvreté et au contraire, creuse l'écart dans les revenus par habitant.

³³⁹ Deharo, A. (2017). *Allemagne : une croissance économique dopée par l'arrivée des réfugiés*. *Rtl.fr*. Consulté 26 septembre 2017, à l'adresse <http://www.rtl.fr/actu/international/Allemagne-une-croissance-economique-dopee-par-l-arrivee-des-refugies-7786775503>

³⁴⁰ BMW. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMW]. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

³⁴¹ Le Boucher, E. (2012). *Le miracle de l'emploi allemand*. *Slate.fr*. Consulté 26 septembre 2017, à l'adresse <http://www.slate.fr/story/50565/emploi-alle-magne-chomage-miracle-crise>

3/ Aussi, la croissance du PIB est due à **une balance commerciale (X-M) positive** et en constante croissance (figure 53).

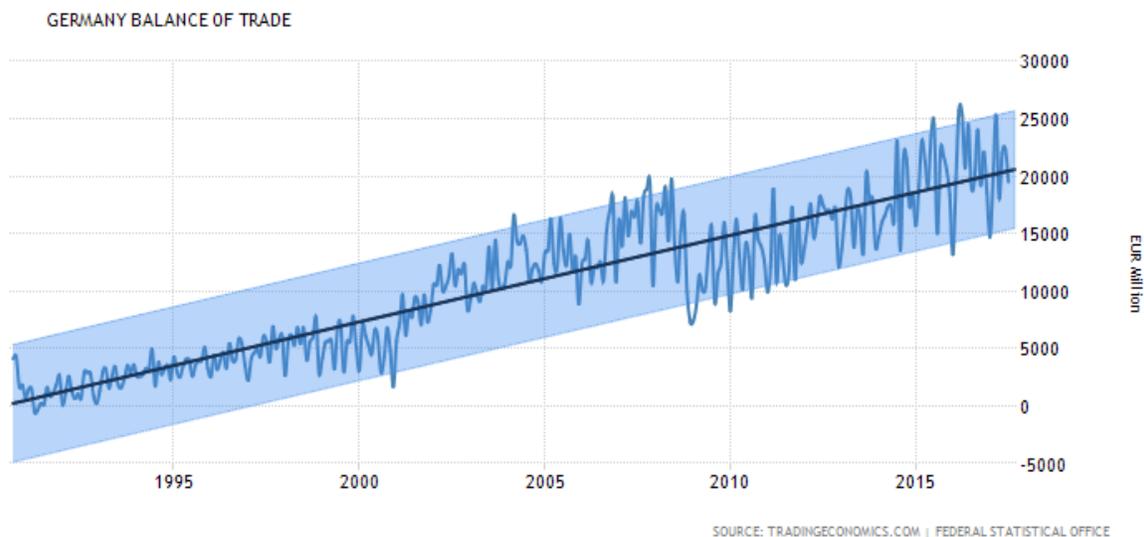


Figure 53. Croissance de la balance commerciale [milliards d’euro], entre 1990 et 2017

Source : (Ieconomics inc, 2017)³⁴²

Les exportations de biens et services globaux ont augmenté de 12% entre 2010 et 2015, et représentent près de 50% du PIB du pays (Guay, 2017)³⁴³. Forte de son économie d’exportation, l’Allemagne se place en tant que leader sur le marché des exportations³⁴⁴ de

³⁴² Ieconomics Inc. (2017). *Germany Balance of Trade Forecast*. Tradingeconomics.com. Consulté 17 septembre 2017, à l'adresse <https://tradingeconomics.com/germany/balance-of-trade/forecast>

³⁴³ Guay, J. (2017). *Allemagne - Exportations de biens et services (% du PIB) | Statistiques*. Perspective.usherbrooke.ca. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/DEU/fr/NE.EXP.GNFS.ZS.html>

³⁴⁴ L’Allemagne a exporté principalement vers l’Autriche et les Pays-Bas. Le troisième acheteur a été la France, avec 13,3 TWh d’importations allemandes pour 3,8 TWh d’exportations vers son voisin d’Outre-Rhin.

l'électricité. En 2015, le solde d'exportation d'électricité est de 50 TWh, ce qui représente une hausse de 50% par rapport à 2014 (Lauer, 2016). Il faut savoir toutefois que le prix du charbon et du carbone étant très bas, l'électricité exportée provient majoritairement des centrales à charbon³⁴⁵, ce qui favorise également des prix spot faibles.

De plus, améliorer l'intensité énergétique (figure 54) permettrait de réduire la consommation d'énergies et « les importations en énergie de 4 milliards d'euros en 2030 par rapport à un scénario sans gain en efficacité », d'assurer un solde exportateur plus grand et de ce fait, d'accroître le PIB. C'est ce qu'on observe dans la figure ci-dessous, avec un rapport PIB/énergie utilisée de plus en plus grand :

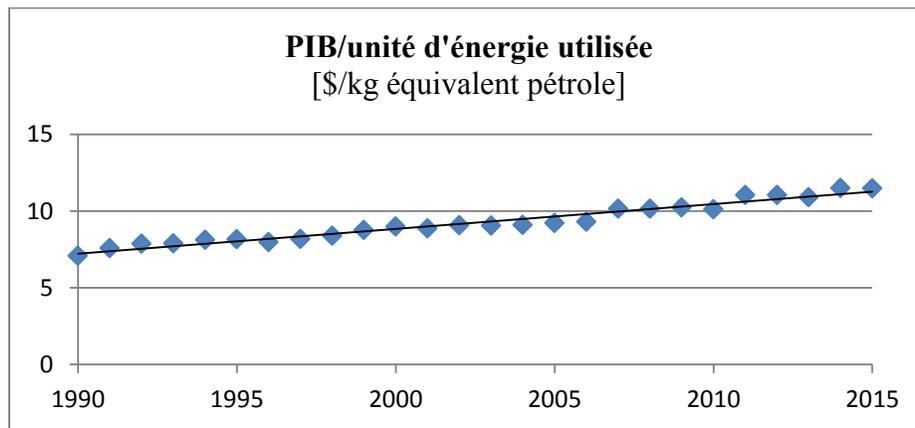


Figure 54. Croissance du rapport PIB / unité d'énergie utilisée [\$ / kg équivalent pétrole]. Source: World Data Bank, 2017³⁴⁶

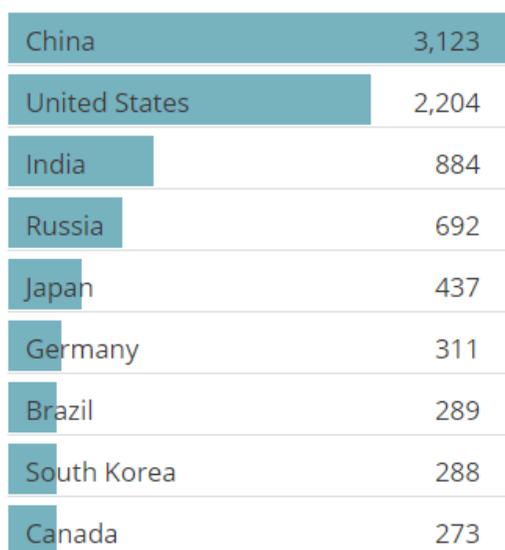
³⁴⁵ On ne peut pas vraiment savoir la provenance de l'énergie exportée et importée (puisque l'on ne sait pas d'où proviennent les électrons, car ils sont rattachés au même réseau (Livet, F. (2017). *La France exporte de l'électricité vers l'Allemagne!*. Grenoble : Univ. Grenoble Alpes & CNRS. Consulté à l'adresse http://sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Livet_Allemagne.pdf)

³⁴⁶ World Data Bank, 2017, API_DEU_DS2_en_excel_v2 (version 2) [Excel]. Consulté à l'adresse: <https://data.worldbank.org/country/germany?view=chart>

3.4.2 La situation énergétique allemande actuelle (2014, 2015 et 2016)

3.4.2.1 Classement mondial

Bien que l'on ait vu, d'après la Figure 54, qu'il est possible de créer plus de valeurs avec moins d'énergie, l'Allemagne reste parmi les plus grands consommateurs d'énergie au monde, en se plaçant 6^{ème} au rang mondial :



China	3,123
United States	2,204
India	884
Russia	692
Japan	437
Germany	311
Brazil	289
South Korea	288
Canada	273

Tableau XIV. Classement de la consommation énergétique allemande dans le monde [Mtoe], Source : Enerdata, 2017³⁴⁷

³⁴⁷ Enerdata. (2017). *World Energy Consumption Statistics*. Yearbook.enerdata.net. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> Enerdata.

Mais, ramené à sa population, l'Allemagne ne se place pas en tête du peloton dans la consommation d'énergie per capita. Elle est classée 31^{ème} au rang mondial, bien après le Canada (8^{ème}), les États-Unis (9^{ème}) et son voisin la Norvège (10^{ème})³⁴⁸ (tableau XV).

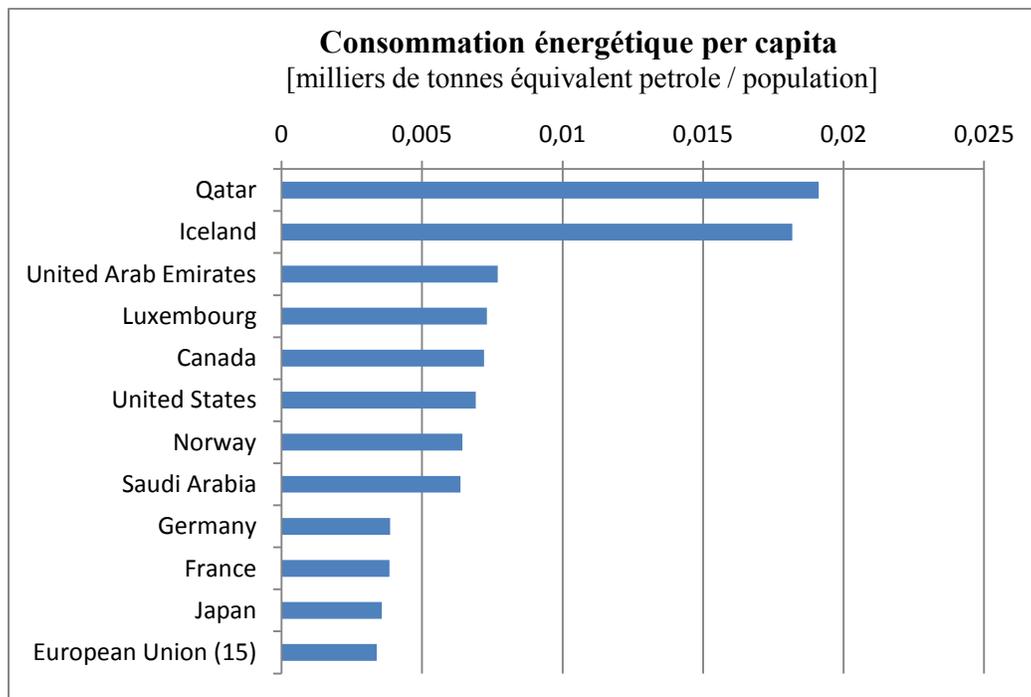


Tableau XV. L'Allemagne classée au 31^{ème} rang mondial de la consommation d'énergie per capita [ktoe/population], en 2013.

Source : World Resources Institute, 2017³⁴⁹

³⁴⁸ Afin d'éviter d'avoir un trop grand tableau, des données intermédiaires ont été supprimées. Ce tableau ne relève donc pas le classement des pays mais donne un ordre de grandeur de la consommation par capita.

³⁴⁹ World Resources Institute. (2017). *WRI's climate data explorer, CAIT_Country_GHG_Emissions_-_All_Data-02022017* [Excel]. *CAIT Climate Data Explorer*. Consulté le 19 septembre 2017, à l'adresse <http://cait2.wri.org/historical/US%20State%20GHG%20Emissions>

3.4.2.2 Flux énergétique

L'Allemagne importe 74% de son énergie en pétrole, charbon, gaz et électricité; le reste est produit sur le sol allemand. Le TPES allemand (l'approvisionnement en énergie primaire) s'élève à 15 916 PJ ou 307,8 Mtoe, ou 3580 TWh (figure 55). Une partie de cette énergie est exportée à l'international (16%), une autre est perdue en énergie libre suite aux conversions d'énergie (22%), et consommé par le secteur énergétique (4%). L'autre partie est consommée en énergie finale (55%) répartie dans les secteurs industriel, résidentiel, commercial, et les transports pour une utilisation finale.

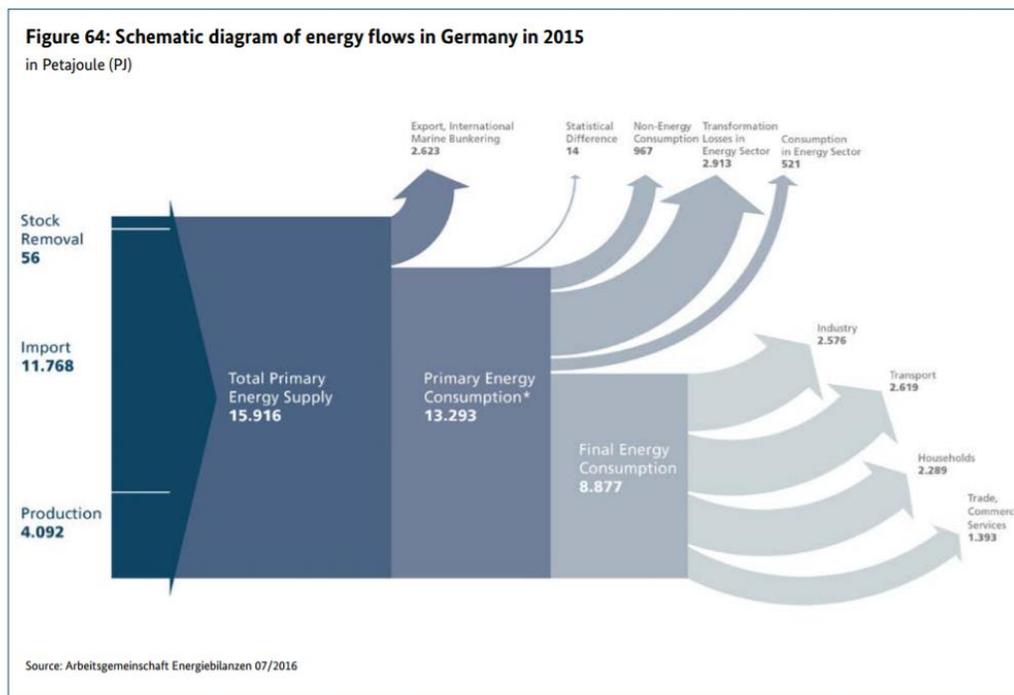


Figure 55. Flux énergétique allemand en 2015. Source : BMWI, 2016 : 60³⁵⁰

³⁵⁰ BMWI. (2016). *Renewable Energy Sources in Figures* (p. 7). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=13

3.4.2.3 Part des énergies fossiles dans le TPES

D'après les données les plus récentes de l'IEA, les énergies fossiles restent très présentes dans l'approvisionnement énergétique primaire (TPES) allemand, avec une part de 86% en 2015 (Figure 56) contre 14% pour les renouvelables. En 2016, la part des ER est de 12,6% (Figure 57).

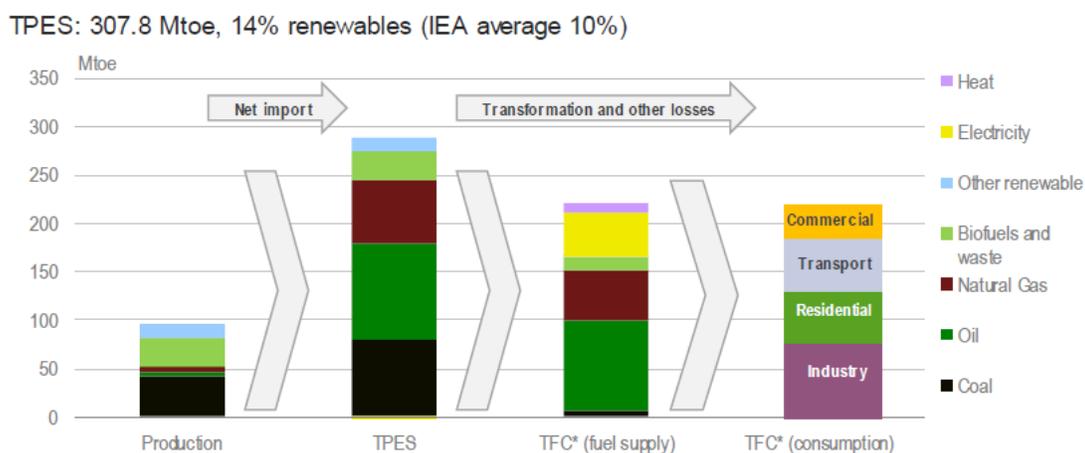


Figure 56. Système de transformation énergétique allemand en 2015

Source : AIE, 2017³⁵¹

D'après les données de Clean Energy Wire (Figure 57), le tiers de l'énergie primaire mobilisée en Allemagne, en 2016, est du pétrole (34%); le quart, du charbon (23,6%) et 22,7% est la part du gaz naturel.

³⁵¹ AIE. (2017). *Germany - Energy System Overview 2015*. AIE/OCDE. Consulté à l'adresse <https://www.iea.org/media/countries/Germany.pdf>

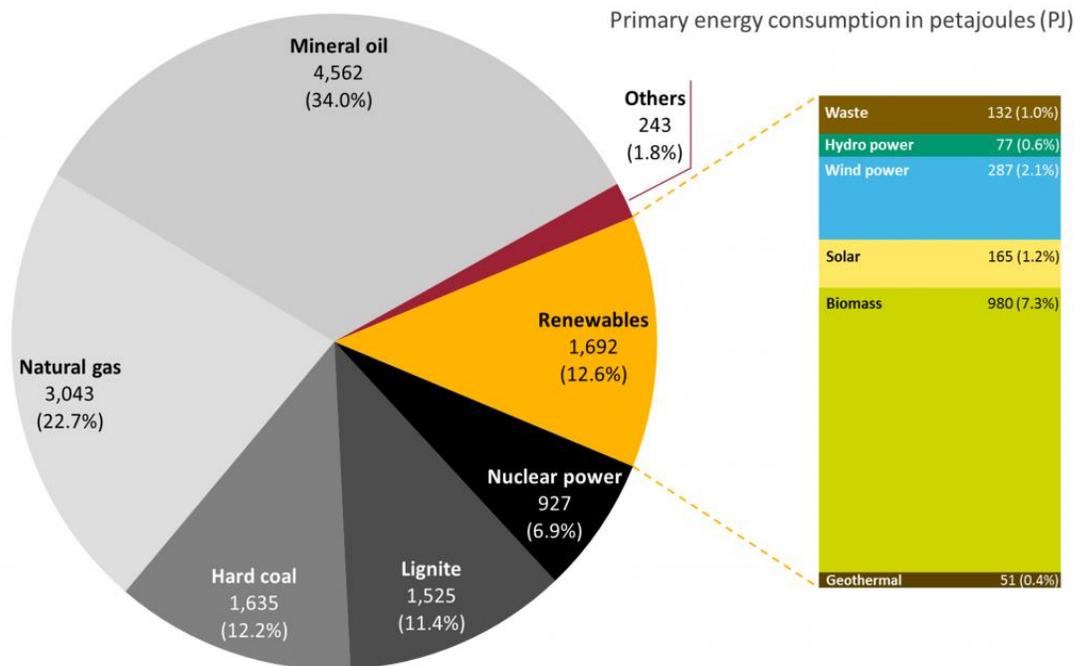


Figure 57. Part des énergies dans le TPES en 2016

Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017³⁵²

Cette énergie primaire est consommée principalement pour être transformée en énergie thermique, en énergie électrique (l'électricité représente environ 20% de la consommation du pays) et en carburant pour le transport.

3.4.2.3.1 Le pétrole

C'est la ressource la plus utilisée, représentant plus du tiers du TPES (34%) en 2016 (Figure 57), c'est-à-dire plus de 100 millions de tonnes équivalent pétrole approvisionnées en Allemagne, en comparaison au charbon qui s'élève à 80 millions de tonnes équivalent pétrole.

³⁵² Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

3.4.2.3.2 *Le pétrole domine le marché des transports*

Le pétrole est particulièrement présent dans le secteur des transports. Il fournit 92% de l'énergie consommée dans ce secteur. Le bio fioul dans ce secteur est présent mais sa consommation et sa part de marché diminuent. Cette ressource représente une part de 5% en 2014. En 2008, elle représentait une part de 5,5%. (2790 Mtoe). Sa consommation dans ce secteur a cru de 3% par rapport à l'année précédente (2013), mais globalement elle est en baisse depuis 2008 (2 944 Mtoe).

3.4.2.3.3 *Le charbon*

Le charbon, pourtant « responsable à 60% de la hausse des GES dans le secteur mondial de l'énergie » (De Monicault, 2016)³⁵³ est la deuxième ressource la plus importante en Allemagne (23,6%, d'après la figure 57). L'Allemagne, qui possède ses propres réserves en lignite, en est le premier producteur mondial, devant la Chine, la Russie et les États-Unis, et le quatrième plus grand consommateur (Tableau XVI).

³⁵³ De Monicault, F. (2016). *Le monde peut-il se passer de charbon? Le Figaro*. Consulté à l'adresse <https://www.pressreader.com/france/le-figaro/20160301/281517930202725>

China	3,546
India	922
United States	661
Germany	226
Russia	210
South Africa	194
Japan	191

Tableau XVI. Classement mondial des plus grands producteurs de lignite et de houille [Mt] en 2016, Source : Enerdata, 2017³⁵⁴

100 millions de tonnes sont extraits chaque année dans la région de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie qui accueille trois mines à ciel ouvert³⁵⁵ et qu'il est prévu d'exploiter jusque vers 2050, malgré leur contribution importante aux émissions de gaz à effet de serre. Concernant la houille, consommée dans le secteur de la sidérurgie³⁵⁶ et des centrales électriques, elle est majoritairement importée, à 90%.

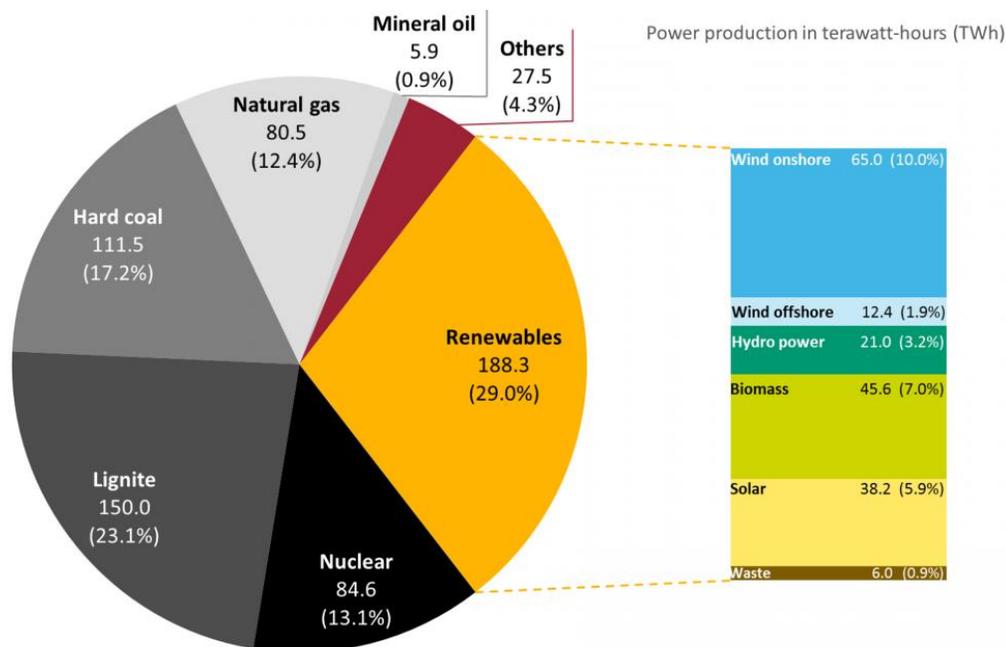
³⁵⁴ Enerdata. (2017). *Coal and lignite Production Data | World Coal Production* | Enerdata. Yearbook.enerdata.net. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-production-data.html>

³⁵⁵ Le nom des mines est Hambach, Inden I & II et Garzweiler I, détenues par le groupe RWE-RHEINBRAUN, filiale du holding RWE

³⁵⁶ En sidérurgie, pour la fabrication de l'acier, on utilise la houille. « On emploie du charbon concentré en carbone quasi pur, le coke. Il est utilisé dans les hauts-fourneaux, des fours industriels où, mélangé à du minerai de fer, il donne de la fonte (alliage de fer et de carbone, précurseur de l'acier) par réduction des oxydes de fer » (SEME GAUCHE. (2015). *L'utilisation du charbon : électricité, sidérurgie, carbochimie. Planète Énergies*. Consulté le 9 août 2017, à l'adresse <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-utilisation-du-charbon-electricite-siderurgie-carbochimie>)

3.4.2.3.4 Le charbon domine le marché de l'électricité

Le charbon est l'une des sources d'énergie les plus importantes sur le marché de l'électricité (Figure 58). Sur les 648,3 TWh d'électricité produite, il représente une part de 36,2% en 2016. Par ailleurs, « en raison du faible coût de ses centrales à charbon, anciennes et amorties, l'Allemagne est devenue le premier exportateur européen d'électricité » (Criqui, 2016).



CC BY SA 4.0

Figure 58. Part des énergies dans la production d'électricité allemande en 2016

Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017³⁵⁷

« La production allemande d'électricité est encore assurée à près de 70% par les sources d'énergie conventionnelles » (BMW, s.d.)³⁵⁸. Majoritairement, l'électricité est consommée

³⁵⁷ Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

dans le secteur résidentiel (37%), près du tiers dans le secteur industriel, près du tiers dans le secteur tertiaire puis les 4% restants en agriculture et en transport. Concernant ce dernier, les véhicules électriques croissent rapidement, même si leur part de marché demeure encore faible, équivalant à moins de « 1 % des nouvelles immatriculations » (BMW, 2016)³⁵⁹.

3.4.2.3.5 Le gaz

D'après la Figure 58, le gaz naturel est la troisième source d'énergie primaire la plus importante dans le mélange énergétique allemand, après le pétrole et le charbon. En 2016, sa part de consommation d'énergie primaire s'est élevée à 22,7% », ce qui représente plus de 85 milliards de m³/an.

Concernant son approvisionnement en gaz, ses propres ressources gazières proviennent de gaz conventionnel, c'est-à-dire de gaz provenant d'une roche perméable, et qui est extrait par fracturation hydraulique (BMW, s.d.)³⁶⁰. Concernant ses importations, celle-ci importe 93% de son gaz, principalement de Russie, Norvège et Pays-Bas. De nouveaux projets d'importation de gaz ne manquent pas (Figure 59) :

³⁵⁸ BMW. *Les pierres angulaires de la sécurité énergétique*. BMW.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Dossier/energies-conventionnelles.html>

³⁵⁹ BMW. (2016). *Cinquième rapport de suivi « Transition énergétique »* (p. 14). Berlin : Le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMW]. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

³⁶⁰ *In 2015, approx. 8.6 billion cubic meters of natural gas was extracted, 8.5 billion of this total by means of —hydraulic fracturing”, or —fracking”. Conventional fracking has been deployed in Germany for many years and is a proven method of extracting natural gas from sandstone rock formations. Safety is the number one priority where fracking is concerned: fracking is banned in sensitive areas. Also, the Federal Government has clearly stated its opposition to the use of —unconventional fracking”; no experience has been gathered with this in Germany so far.* BMW. *Key factors for a secure energy supply*. BMW.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/EN/Dossier/conventional-energy-sources.html>

« Le 24 avril 2017, l'ancien chancelier allemand signe un accord avec cinq entreprises partenaires de Gazprom dans le gazoduc Nord Stream 2 (NS2) de 1 220 kilomètres de long qui doublera le NS1 pour acheminer du gaz russe jusqu'au nord de l'Allemagne : une quantité de 55 milliards de m³ sera acheminée en Allemagne, ce qui représente la moitié de sa consommation » (Bezat et Mandraud, 2017)³⁶¹.

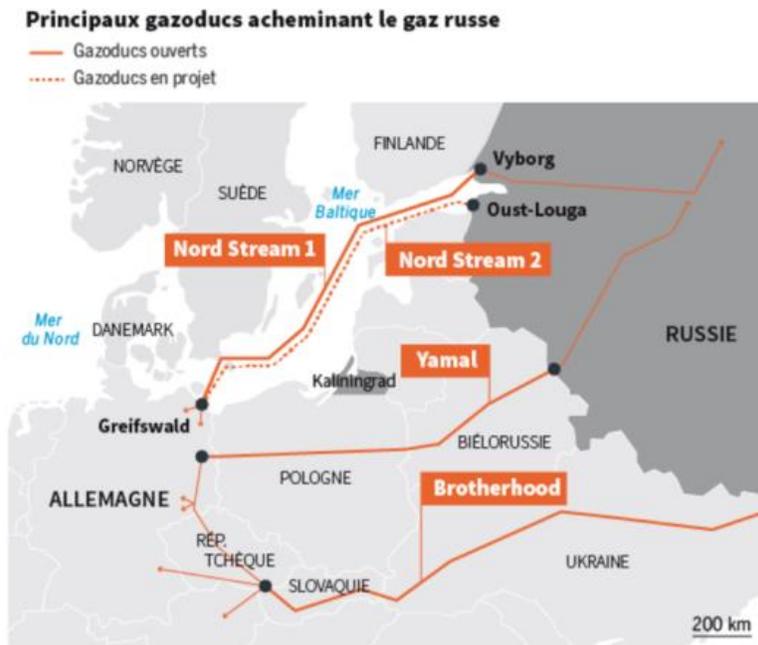


Figure 59. Principaux gazoducs acheminant le gaz russe

Source : Bezat et Mandraud, 2017³⁶²

³⁶¹ Bezat, J., & Mandraud, I. (2017). *Le nouveau gazoduc Nord Stream 2 divise l'Europe*. *Le Monde.fr*. Consulté le 9 août 2017, à l'adresse

http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/04/25/le-nouveau-gazoduc-nord-stream-2-divise-l-europe_5117043_3234.html#YSg2yBarpp7Fwm18.99

³⁶² *Ibid.*

3.4.2.3.6 *Le gaz domine le marché de la chaleur*

La production de chaleur reste, et de loin, le marché le plus important pour le gaz naturel. Mais son utilisation n'est pas limitée à la production de chaleur. Le gaz naturel est considéré comme une source d'énergie flexible et « polyvalente » (BMWI, s.d.)³⁶³, permettant de :

- compenser l'intermittence de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables
- remplacer le charbon
- service de carburant pour les transports.

Le gaz naturel est aussi considéré comme une ressource plus respectueuse du climat que les autres sources d'énergie fossiles, car sa combustion dégage moins de CO₂ (BMWI, s.d.)³⁶⁴.

3.4.2.4 Part des ER dans le TPES

3.4.2.4.1 *TPES*

En 2016, la part des ER dans le mix énergétique primaire s'élève à 12,6% (figure 57).

L'Allemagne est un chef de file dans le marché des énergies renouvelables.

L'énergie renouvelable dont elle dispose est majoritairement la biomasse qui, d'après la Figure 57, représente plus de la moitié (57,9%) de la consommation énergétique à partir des ER, soit 7% du TPES en 2016. Mais son exploitation soulève des questions sur la durabilité de la

³⁶³ BMWI. *Les pierres angulaires de la sécurité énergétique*. BMWI.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/energies-conventionnelles.html>

³⁶⁴ Voir note 293.

ressource et sur l'impact réel de la déforestation sur les GES. Déjà 2,5 millions d'hectares de terrains agricoles ont été utilisés, ce qui représente 15% des 16,7 millions d'hectares des terres agricoles. Comme c'est une pratique de plus en plus décriée, un plafond fixé à 4 millions d'hectares d'ici 2020 est mis en place par mesure de sécurité environnementale pour ne pas empiéter sur des terrains agricoles³⁶⁵. Par ailleurs, une limitation à 100 MW de nouvelles centrales à biogaz par an depuis 2014 est instaurée.

Viennent ensuite, par ordre d'importance dans le TPES, l'énergie éolienne (2,1%), le photovoltaïque (1,2%), l'hydroélectricité (0,6%) et la géothermie (0,4%). Pour ces deux dernières, le potentiel de l'hydroélectricité a été largement exploité avec 19,3 TWh d'hydroélectricité produite en 2015. Quant à la géothermie, elle y est peu développée.

Concernant l'énergie éolienne terrestre, il s'agit de la « source la moins chère des nouvelles ER et représente environ 12% de l'approvisionnement en électricité du pays en 2015 » (Morris et Pehnt, 2012 : 49). En 2014, 3,5 GW supplémentaire d'éolien terrestre ont été installés, et des anciennes turbines ont été remplacées. En 2014, on compte une puissance record de 4,4 GW de puissance installée supplémentaire, dont environ un quart sert à remplacer les anciennes turbines ayant été mises à l'arrêt. Pour l'offshore, l'agence fédérale des réseaux a émis des appels d'offre pour un projet d'installation de 6,5 GW en 2020 et 15 GW entre 2021 et 2030 (Bornemann, 2015)³⁶⁶.

À propos du secteur de l'énergie solaire, l'Allemagne est l'un des marchés du solaire photovoltaïque les plus importants au monde. Elle possède, après la Chine, la plupart des PV

³⁶⁵ « L'expansion de la production de biomasse ne doit pas entrer en conflit avec la sécurité alimentaire, le droit à l'alimentation, la protection de l'environnement et de la nature » (ministère allemand, 61).

³⁶⁶ Bornemann, B. (2015). Allemagne : *Un point sur les projets éolien en mer*. *Energiesdelamer.eu*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse

<http://www.energiesdelamer.eu/publications/112-8allemagne-un-point-sur-les-projets-eolien-en-mer>

installés. Ces panneaux représentent une puissance installée de 39 GW à la fin 2015 (Association Hespul, 2016)³⁶⁷. L'Allemagne mise sur cette filière particulière car, selon les études, approvisionner le pays par l'intégration de grandes quantités d'énergie solaire est envisageable. Cette technique serait en effet capable actuellement de couvrir 50% de la demande énergétique allemande :

« Le 9 juin 2014, l'Allemagne a non seulement battu son record de production d'énergie solaire, mais ses installations solaires ont également produit plus de la moitié des besoins en électricité du pays (50,6% de la consommation du jour) » (Loiret, 2014)³⁶⁸.

D'autres filières restent très timides, comme le carburant renouvelable dont la production nationale ne représente que 5% de la consommation totale de carburant.

3.4.2.4.2 *Chaleur et électricité*

Concernant l'électricité, « près d'un kilowattheure consommé sur trois provenait déjà de sources d'énergie renouvelables » en 2016. Pour le chauffage, un tiers des nouveaux bâtiments construits en Allemagne disposent en 2015 de systèmes de chauffage équipés d'une pompe à chaleur. 2,15 millions de collecteurs solaires thermiques sur les toits ont été installés en 2015. Les ER en Allemagne auraient compensé « environ 168 millions de tonnes CO₂eq, dont 103 millions uniquement dans le secteur électrique ». Elles auraient par ailleurs compensé 9,1

³⁶⁷ Association Hespul. (2014). *Photovoltaïque.info | Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité | L'Allemagne. Photovoltaïque.info*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.photovoltaïque.info/L-Allemagne.html>

³⁶⁸ Loiret. (2014). *Production d'électricité solaire : record battu. Aterno*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.chauffage-aterno.com/record-production-electricite-solaire-en-allemande.html>

milliards d'euros en importation d'énergie, ce qui veut dire qu'elles ont évité d'importer 9,1 milliards d'euros d'électricité.

3.4.3 Quelle évolution de la consommation/production d'énergie depuis le lancement de l'« Energiewende »?

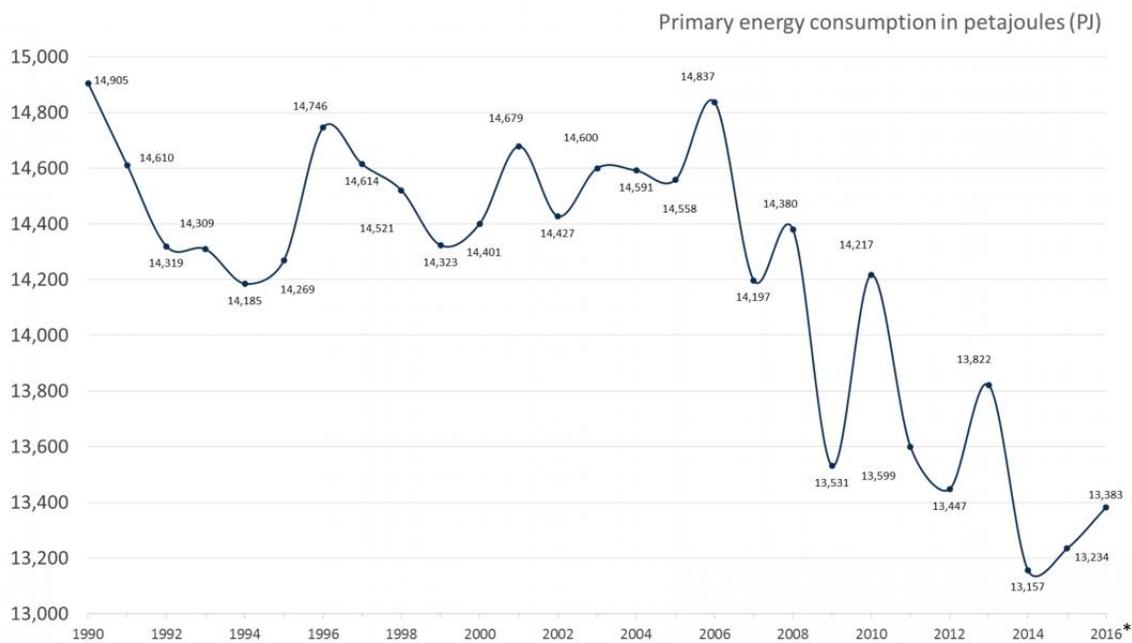
Certaines données ont pu être trouvées pour 2016 telles que le part des ER dans le mix énergétique électrique ; en 2015, telle que le TPES, la TFC, le PIB et la part des ER dans le mix énergétique. Cependant, puisque 2014 est l'année des dernières données officielles des statistiques complètes du paysage énergétiques allemand, données par l'AIE, nous établirons des comparatifs à cette date.

3.4.3.1 Consommation d'énergies primaires et finales

Depuis la mise en place du plan énergétique allemand, en 2010 :

- le TPES a baissé de 6% entre 2010 et 2014. Mais depuis 2014, on voit une légère progression du TPES (+0,6% entre 2014 et 2015), et une croissance de +1,1% entre 2015 et 2016 (figure 60). « La croissance économique et les températures plus froides ont contribué à cette évolution » (BMW, 2016 : 2)³⁶⁹ :

³⁶⁹ BMW. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMW]. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10



*2016: preliminary data

© BY SA 4.0

Figure 60. Consommation d'énergie en Allemagne entre 1990 et 2016

Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017³⁷⁰

-Le TFC a baissé de 1,3% entre 2010 et 2014 (tableau XVII). Pas de données publiées après cette date.

³⁷⁰ Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

Country	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2014	FEC targets	Per capita FEC	Change in energy consumption
EEA	1 135	1 141	1 205	1 268	1 251	1 210	1 206		2	-5
EU28	1 080	1 079	1 131	1 186	1 157	1 102	1 104	1 086	2,2	-7
Austria	19	21	24	28	28	27	28	26,2	3,3	-0,8
Belgium	32	35	38	37	38	37	35	32,5	3,1	-5,2
Bulgaria	16	11	9	10	9	9	9	8,6	1,2	-13,9
Croatia	6	4	5	6	6	6	6	7	1,4	-8,4
Cyprus	1	1	2	2	2	2	2	1,8	1,9	-11,9
Czech Republic	32	26	25	26	25	24	24	24,4	2,3	-8,3
Denmark	13	15	15	16	15	14	14	14,8	2,5	-8,4
Estonia	6	3	2	3	3	3	3	2,9	2,2	-0,3
Finland	21	22	25	25	26	25	25	26,7	4,5	-2,5
France	136	143	155	163	158	151	152	131,4	2,3	-5,2
Germany	229	222	220	219	220	213	217	194,3	2,6	-0,6
Greece	45	46	46	44	46	47	45	46,4	4,4	20,0

Tableau XVII. Consommation d'énergie finale (FEC) en Mtoe, de 1990 à 2014

Source : European Environment Agency, 2017³⁷¹

1.1.1.7 Consommation d'énergies fossiles

Parmi les énergies primaires fossiles utilisées en Allemagne :

- Gaz naturel et nucléaire ont toutes diminué entre 2010 et 2014. Le nucléaire connaît la plus forte décroissance (-31%) suivi du gaz naturel (-17%). Dès 2010, la fermeture de 8 réacteurs a fait diminuer de moitié la capacité installée des centrales nucléaires (figure 61).

³⁷¹ European Environment Agency. (2017). *Final energy consumption by sector and fuel*. European Environment Agency. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>

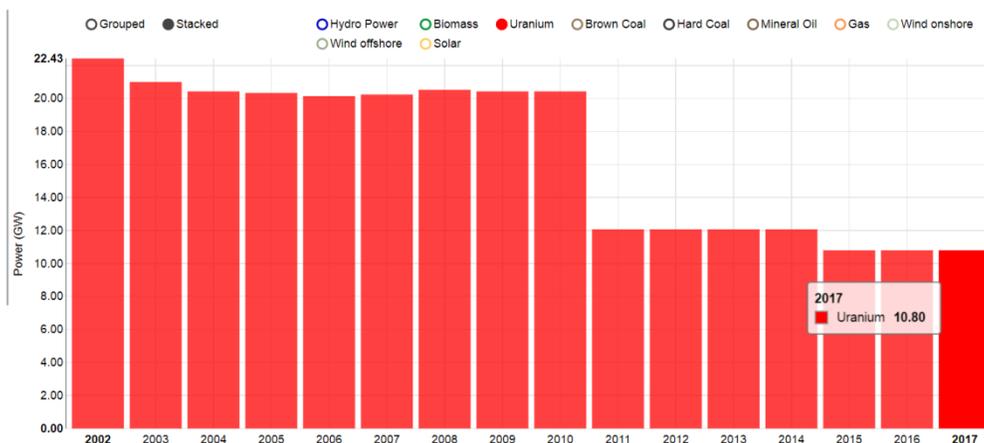


Figure 61. Diminution de la capacité installée de production d'électricité par le nucléaire

Source : Fraunhofer, 2017³⁷²

- La consommation de charbon baisse (Figure 62). Sa part dans la production d'électricité baisse en 2016 à 36,1% (45% dans sa production en 2014) (AIE, 2017)³⁷³, la mobilisation du charbon aurait tendance à stagner avec une petite croissance de 1% entre 2010 et 2014. Entre 2014 et 2015, le TPES en lignite baisse entre 2014 et 2015 passant de 1574 à 1565 PJ, et la houille passe de 1759 à 1718 PJ (BMWl, 2016 : 7)³⁷⁴. Entre 2014 et 2016, la houille et le lignite baissent de 5%.

³⁷² Fraunhofer. (2017). *Installed power in Germany | Energy Charts*. Energy-charts.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse https://www.energy-charts.de/power_inst.htm

³⁷³ AIE. (2017). *Germany: Electricity and Heat for 2014*. Iea.org. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?year=2014&country=GERMANY&product=ElectricityandHeat>

³⁷⁴ BMWl. (2016). *Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2015* (p. 7). Berlin: BMWl.

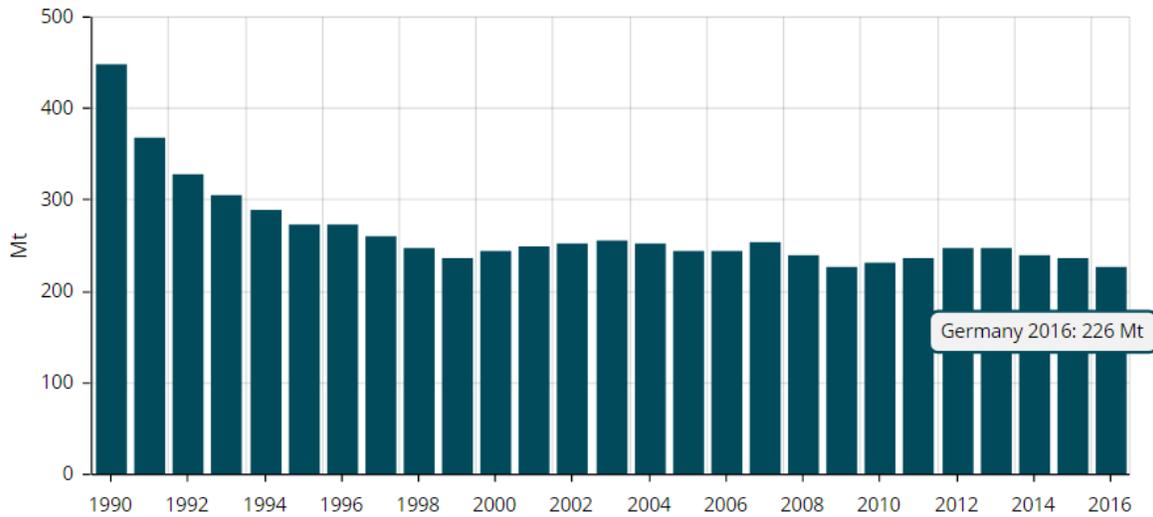


Figure 62. Évolution de la consommation de charbon [Mt] en Allemagne entre 1990 et 2016. Source : Enerdata, 2017

Toutefois suite à la fermeture de centrales nucléaire en 2012, la capacité installée de production d'électricité à partir de houille a augmenté de 9 GW (Figure 63).

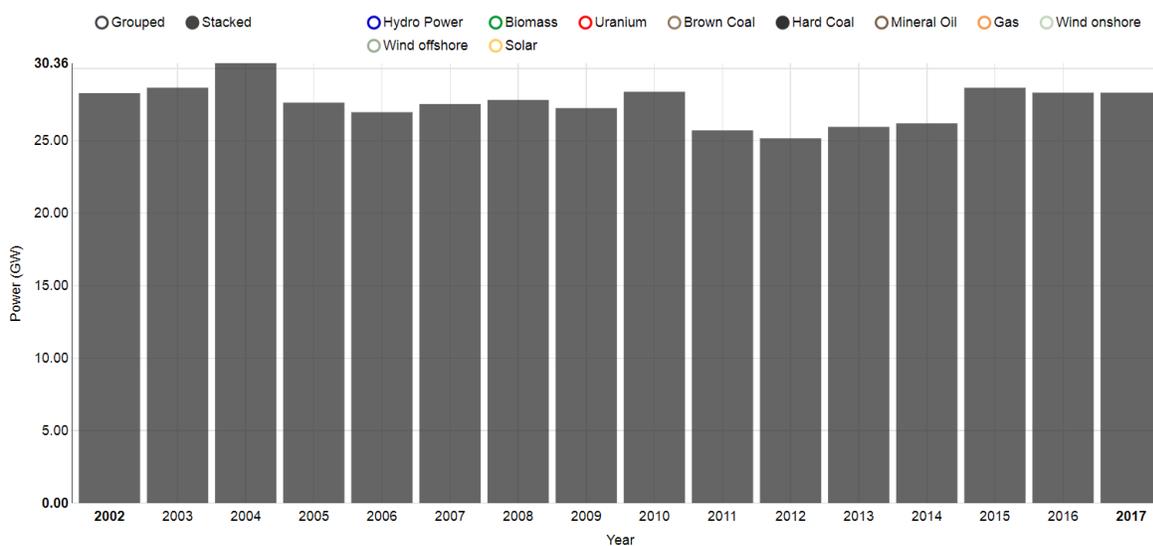


Figure 63. Évolution de la capacité installée des centrales à houilles pour la production d'électricité. Source : Fraunhofer, 2017³⁷⁵

- Le pétrole suit une très faible diminution annuelle depuis 2010 et connaît une forte augmentation de 30% entre 2014 et 2016 pour le pétrole brut, passant de 3,5 Mt (2014) à 4,61 Mt (2016) (Figure 64).

³⁷⁵ Fraunhofer. (2017). *Installed power in Germany* | *Energy Charts*. Energy-charts.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse https://www.energy-charts.de/power_inst.htm

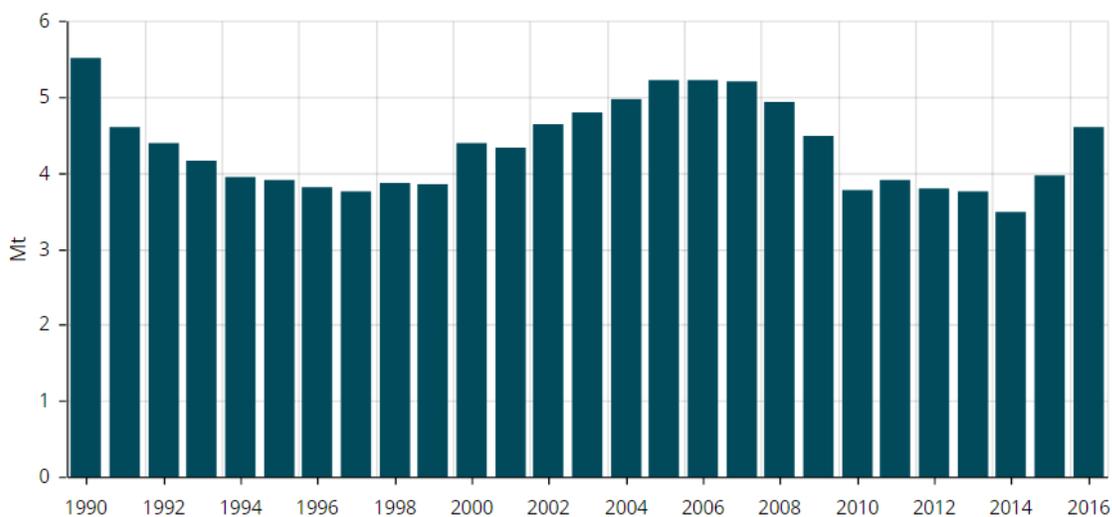


Figure 64. Approvisionnement de pétrole brut en Allemagne de 1990 à 2016

Source : Enerdata, 2017³⁷⁶

1.1.1.8 Développement des énergies renouvelables

Dans le cadre de l'Énergiewende, les statistiques de l'évolution des ER sont mesurées à partir de la consommation d'énergie finale (TFC) et non pas du TPES. **Au niveau de la TFC**, les renouvelables sont celles qui progressent le plus, avec, en 2015, une part de 14,9% de la consommation énergétique finale totale consommée en Allemagne, comparée à 13,6% en 2014 (Figure 65).

³⁷⁶ Enerdata. (2017). *Crude Oil Production Statistics | Crude Oil | Enerdata*. Yearbook.enerdata.net. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://yearbook.enerdata.net/crude-oil/world-production-statistics.html>

Figure : Évolution de la part des énergies renouvelables sur la consommation brute d'énergie finale en pour cent

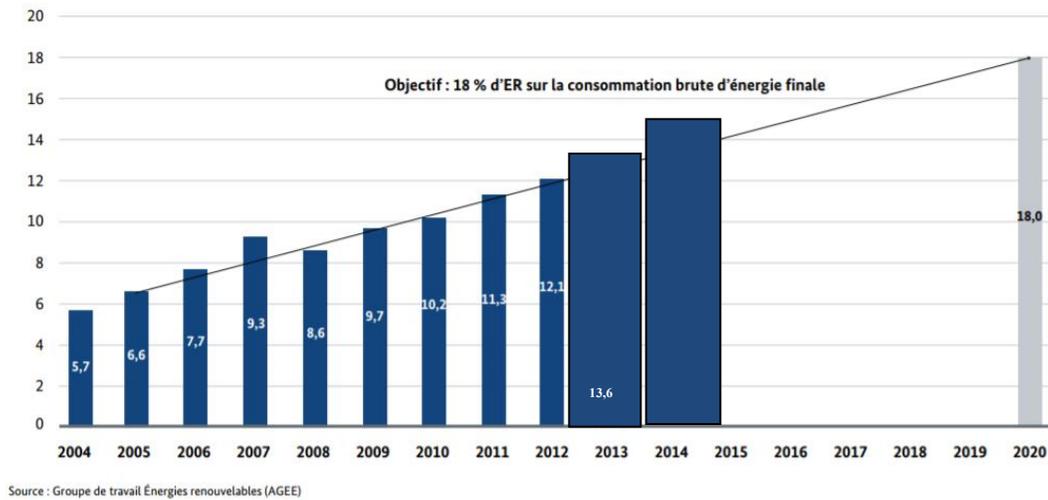


Figure 65. Part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale

Source : BMWI, 2014 : 8³⁷⁷³⁷⁸

Concernant l'utilisation des renouvelable dans la production de chaleur, celle-ci « affiche une évolution positive. En 2015, 13,2 % (environ 157,8 milliards de kWh) de la consommation de chaleur était couverte par les énergies renouvelables, contre 12,5 % en 2014. » (BMWI, 2016). La part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie s'est ainsi établie à 14,9 %, en hausse de 1,3 point par rapport à 2014.

³⁷⁷ BMWI. (2014). *Premier rapport de suivi « Transition énergétique » Version courte* (p. 8). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fortschrittsbericht-kurzfassung-fr.pdf?_blob=publicationFile&v=5

³⁷⁸ Les barres bleues de 2014 et 2015 ont été ajoutées avec les données du rapport de 2016 (BMWI. (2016). *Renewable EnergySources in Figures* (p. 7). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?_blob=publicationFile&v=13)

Dans le secteur de l'électricité, on voit une stagnation en 2015 et 2016, progression de seulement 0,1% entre ces deux années (de 29,9% à 30,1%) (figure 66).

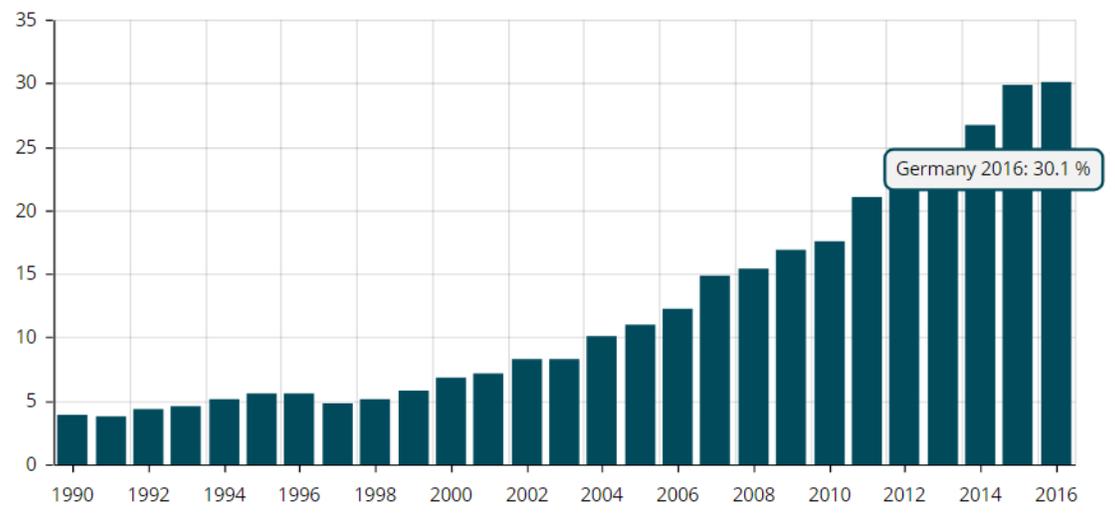


Figure 66. Evolution de la part [%] des renouvelables dans la production d'électricité entre 1990 et 2016

Source : Enerdata, 2017³⁷⁹

En 2015, elles ont une part de 14% dans le **TPES totale** consommée en Allemagne, comparée à 11,5% en 2014. En 2010, elle représentait 9,4%, ce qui représente une croissance de +26% entre 2010 et 2014, avec un taux de croissance³⁸⁰ annuel moyen de 8% sur la période 2010-2015. En l'espace de 25 ans, les ER ont été multipliée par 5,8.

Concernant les capacités installées (figure 67), entre 2010 et 2017, l'éolien et le solaire ont connu une explosion :

³⁷⁹ Enerdata. (2017). *Renewables in Electricity Production | Statistics Map by Region | Enerdata. Yearbook.enerdata.net.* Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>

³⁸⁰ Taux de croissance sur plusieurs années = (valeur présente / valeur passée)^(1/n) - 1 avec n = nombre d'années

- L'éolien a presque doublé (de 26 à 48 GW)
- La solaire a été multiplié par 2,3 (de 18 à 42 GW)

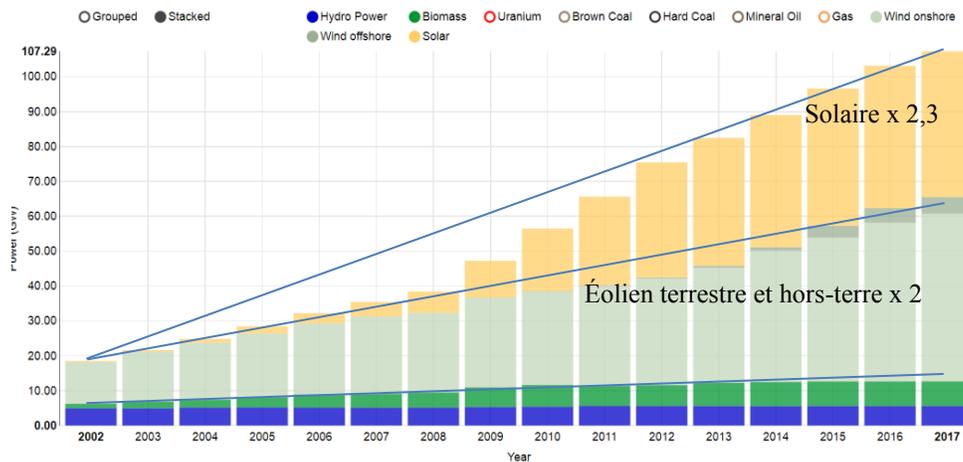


Figure 67. Capacité installée des renouvelables

Source: Fraunhofer, 2017³⁸¹

—The growing significance of renewable energy sources in the power sector is largely due to the Renewable Energy Sources Act (EEG). Since the adoption of the Renewable Energy Sources Act, the proportion of gross power consumption (total volume of electricity consumed in Germany) accounted for by renewable energy has risen from roughly **6% in 2000 to 31.7% in 2016** according to preliminary data. By 2025, 40-45 per cent of electricity consumed in Germany is to derive from renewables” (BMWI, s.d.)³⁸².

³⁸¹ Fraunhofer. (2017). *Installed power in Germany* | Energy Charts. Energy-charts.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse https://www.energy-charts.de/power_inst.htm

³⁸² BMWI. *For a future of green energy*. BMWI.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html>

1.1.1.9 Consommation par secteur

« *Marked progress has been seen in the lowering of energy consumption in buildings. By contrast, the energy consumption in the transport sector actually rose in the period from 2005 to 2014 and therefore clearly lags behind the sectoral goal of the energy concept. Power consumption in Germany has so far developed in line with the goal of achieving a 10 per cent reduction by 2020. By contrast, the power generation decisive for primary energy consumption tends to stay at a constant level in Germany due to rising electricity exports* ». (BMW, 2016: 10)³⁸³

- Seule la consommation énergétique pour le secteur des transports a augmenté (+2,8%).
- Le secteur résidentiel connaît, quant à lui, le plus fort taux de décroissance (-15,2%).
- Concernant le secteur de la production d'électricité, i.e. en tant que vecteur énergétique et en tant qu'énergie finale, celle-ci s'élève en 2015 à 647,1 TWh et 648,3 TWh en 2016. Elle représente alors un pic de production « historique », avec une augmentation d'environ 3 %, soit de près de 20 TWh de plus par rapport à 2014. L'apport des ER est le plus important dans le secteur de l'électricité, elle représentait 17% en 2010 et 32% en 2015, ce qui signifie que sa part a presque doublé en 5 ans (Appunn, Bieler & Wettengel, 2017)³⁸⁴

³⁸³ BMW. (2016). *Green Paper on Energy Efficiency* (p. 7;). Berlin: BMW. Consulté à l'adresse http://www.BMW.de/Redaktion/EN/Publikationen/green-paper-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=3

³⁸⁴ Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

1.1.1.10 Efficacité énergétique

Comme la consommation d'énergie finale a baissé, il paraît logique de déduire que l'efficacité énergétique s'est améliorée, comme le montre le tableau XVIII³⁸⁵, avec une productivité croissante de 1,3% entre 2010 et 2015. Cependant, ce taux d'amélioration n'est pas suffisant pour répondre aux objectifs fixés par l'Energiewende, qui doit être de l'ordre de 2,1%/an.

Efficacité énergétique et consommation		
Consommation d'énergie primaire (par rapport à 2008)	-7,6 %	-20 %  -50 %
Productivité de l'énergie finale (2008-2050)	1,3 % par an (2008-2015)	2,1 % par an (2008-2050)
Consommation brute d'électricité (par rapport à 2008)	-4,0 %	-10 %  -25 %
Besoins en énergie primaire Bâtiment (par rapport à 2008)	-15,9 %	 -80 %
Besoins en chaleur Bâtiment (par rapport à 2008)	-11,1 %	-20 %
Consommation d'énergie finale Transports (par rapport à 2005)	1,3 %	-10 %  -40 %

Source : tableau réalisé par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 12/2016.

* Chiffre provisoire pour 2015

**Objectif de l'Union européenne (UE)

Tableau XVIII. Tableau récapitulatif des taux de croissance et des objectifs 2020

Source : BMWI, 2016 : 2³⁸⁶

En effet, l'Allemagne a pu développer ce secteur pour conquérir une part de 20% sur le marché des produits en efficacité énergétique, ce qui la place en deuxième position sur le marché mondial.

³⁸⁵ « energy productivity » fait référence à l'efficacité énergétique dans le tableau

³⁸⁶ Voir note 352

3.4.4 Diminution des GES

En 2012, l'Allemagne est le huitième pays le plus émetteur de GES, avec 951,7 millions de tonnes de CO_{2eq}³⁸⁷ (Union Européenne, 2017)³⁸⁸. Pour donner un ordre de grandeur, les deux premiers émetteurs de GES sont la Chine et les Etats-Unis, avec respectivement 12,5 et 6,3 milliards de tonnes de CO_{2eq} (Union Européenne, 2017)³⁸⁹.

Concernant ses émissions par habitant, elle est classée 32ème au rang mondial, bien loin derrière le Canada et les États-Unis (figure 68).

³⁸⁷ Souvent mesuré en Gg CO_{2eq}. La production de GES en Allemagne est équivalent à de 1 millions de Gg CO_{2eq} (« Gg » pour « giga gramme », équivalent à « kilo tonnes »).

³⁸⁸ European Union. (2017). *EDGAR - GHG (CO₂, CH₄, N₂O, F-gases) emission time series 1990-2012 per region/country* - European Commission. Edgar.jrc.ec.europa.eu. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=GHGts1990-2012&sort=des9>

³⁸⁹ European Union. (2017). *EDGAR - GHG (CO₂, CH₄, N₂O, F-gases) emission time series 1990-2012 per region/country* - European Commission. Edgar.jrc.ec.europa.eu. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=GHGts1990-2012&sort=des9>

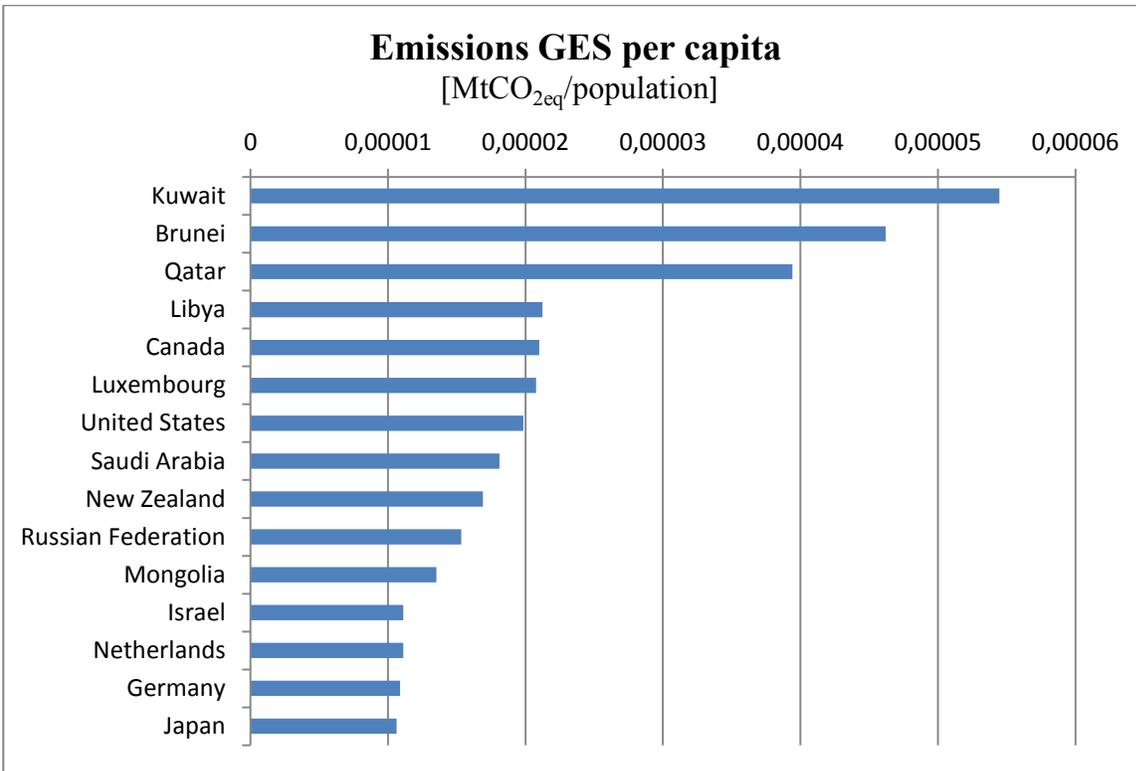


Figure 68. L'Allemagne classée 32ème au rang mondiale des émetteurs GES/capita

Source : World Resources Institute, 2017³⁹⁰

Selon la figure 69, depuis l'entrée en vigueur du plan de transition énergétique allemand, en 2008, les émissions totales de GES de tous secteurs confondus ont diminué de 69 millions de tonnes, passant de 975 à 906 millions de tonnes de CO_{2eq}, ce qui représente une décroissance de 7% dans tous secteurs confondus.

Mais on voit que ces émissions auraient tendance à stagner voire à augmenter depuis 2014, notamment dans le secteur énergétique (figure 70). « Plus d'un tiers des émissions sont liées à

³⁹⁰ World Resources Institute. (2017). *WRI's climate data explorer, CAIT_Country_GHG_Emissions_-_All_Data-02022017* [Excel]. *CAIT Climate Data Explorer*. Consulté 19 Septembre 2017, à l'adresse <http://cait2.wri.org/historical/US%20State%20GHG%20Emissions>

la production d'électricité. [...] En 2015, les émissions dues à la production électrique n'ont guère évolué du fait de l'importance du charbon et du lignite dans la production de base, qui ont rejetés environ 250 MtCO_{2eq} » (Morris et Penht, 2012 : 19). Par ailleurs, l'augmentation des exportations d'électricité « ont en outre empêché une diminution plus forte des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'électricité en dépit du développement des énergies renouvelables » (BMWI, 2016, 16)³⁹¹. Par ailleurs, on pourrait supposer que cela est dû en partie à la croissance de la consommation énergétique dans le secteur des transports (tableau XIX), ce qui n'est pas encourageant pour aboutir aux objectifs de réduction de 2020.

Selon le Protocole de Kyoto, l'objectif était de réduire de 21% ses émissions entre 1990 et 2012. En 2014, elle les avait réduits de 23% par rapport à 1990, et en 2015, de 27,2% (figure 71). Pour atteindre l'objectif de -40%, il faut qu'en 5 ans, on passe de 906 MtCO₂ à 749 MtCO₂. Pour se donner un ordre d'idée, si l'on suppose une diminution linéaire, cela équivaut à diminuer de 31,8 MtCO₂ par an, ce qui représente une baisse de 3,5% par année en moyenne. Or, cette quantité équivaut à celle que l'Allemagne diminue en 5 ans. En 2015, elle avait baissé de seulement de 0,7% par rapport à l'année 2014. Pour atteindre ses objectifs, elle doit donc diminuer environ 5 fois plus de GES que ce qu'elle diminue en moyenne par année. Toutefois, « En net repli en 2014 et malgré la hausse en 2015, les émissions de gaz à effet de serre demeurent toutefois bien inférieures à celles enregistrées en 2013 » (BMWI, 2016 : 16)³⁹².

³⁹¹ Voir note 313

³⁹² BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

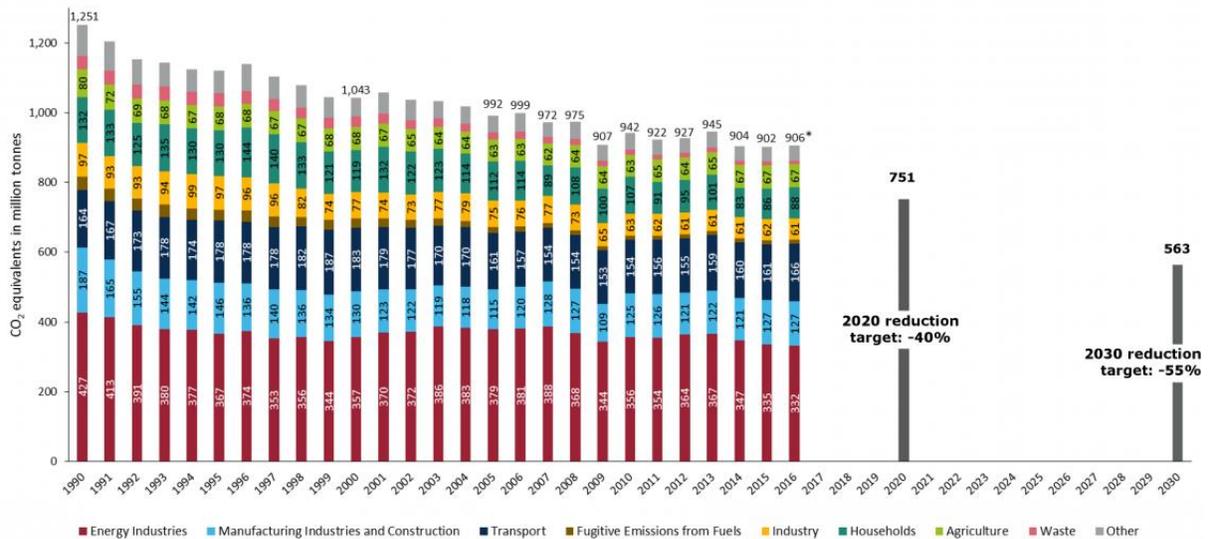


Figure 69. Evolution des émissions GES en Allemagne par secteur entre 1990 et 2016

Source : Appunn, 2017³⁹³

Concernant les émissions CO₂eq issus de la combustion du gaz, pétrole et charbon, l'IEA et le global statistical year book 2017 nous présentent les résultats. Nous nous appuyerons toutefois sur les données du global statistical year book 2017 car ceux-ci donnent les résultats les plus récents (figure 70).

³⁹³ Appunn, K. (2017). *Germany's greenhouse gas emissions and climate targets*. Clean Energy Wire. Consulté le 27 septembre 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-greenhouse-gas-emissions-and-climate-targets>

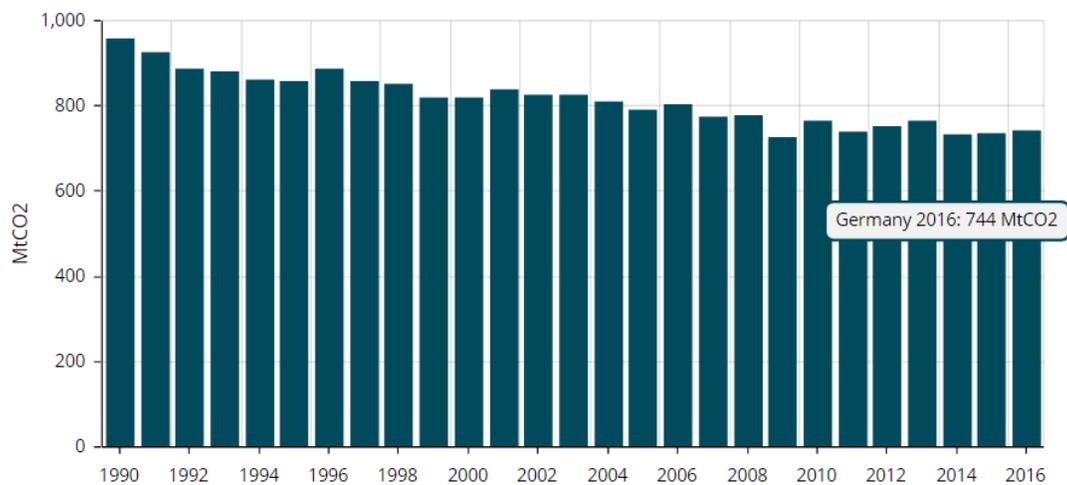


Figure 70. Evolution des émissions CO_{2eq} en Allemagne entre 1990 et 2016

Source : Enerdata, 2017³⁹⁴

3.4.5 Conclusion

Les objectifs de l'« Energiewende » sont-ils en voie d'être atteints?

³⁹⁴ Enerdata. (2017). *CO2 Emissions from fuel Combustion | World Statistics on CO2 Updated | Energy Statistical Yearbook 2017*. Yearbook.enerdata.net. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://yearbook.enerdata.net/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html>

Tableau : Objectifs quantitatifs de la transition énergétique et statu quo (2015)

	2015	2020	2030	2040	2050
Émissions de gaz à effet de serre					
Émissions de gaz à effet de serre (par rapport à 1990)	-27,2 %*	au moins -40 %	au moins -55 %	au moins -70 %	-80 % à -95 %
Énergies renouvelables					
Part dans la consommation finale brute d'énergie	14,9 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Part dans la consommation brute d'électricité	31,6 %	au moins 35 %	au moins 50 % loi sur les EnR 2025 : 40 à 45 %	au moins 65 % loi sur les EnR 2035 : 55 à 60 %	au moins 80 %
Part dans la consommation de chaleur	13,2 %	14 %			
Part dans le secteur des transports	5,2 %	10 %**			
Efficacité énergétique et consommation					
Consommation d'énergie primaire (par rapport à 2008)	-7,6 %	-20 %	→ -50 %		
Productivité de l'énergie finale (2008-2050)	1,3 % par an (2008-2015)	2,1 % par an (2008-2050)			
Consommation brute d'électricité (par rapport à 2008)	-4,0 %	-10 %	→ -25 %		
Besoins en énergie primaire Bâtiment (par rapport à 2008)	-15,9 %	→ -80 %			
Besoins en chaleur Bâtiment (par rapport à 2008)	-11,1 %	-20 %			
Consommation d'énergie finale Transports (par rapport à 2005)	1,3 %	-10 %	→ -40 %		

Figure 71. Etat d'avancement et objectifs à atteindre

Source : BMWI, 2016 : 2³⁹⁵

Globalement, la figure 71 montre que les objectifs de l'Énergiewende en 2020 vont être difficilement atteignables.

³⁹⁵ BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

1/ Bien que l'objectif de réduction des GES de -40% entre 1990 et 2020 sera difficilement atteignable, il ne reste pas moins que 27,2% ont déjà été réalisées entre 25 ans (figure 71), représentant presque $\frac{3}{4}$ de la cible GES à atteindre sur une durée représentant les $\frac{3}{4}$ du temps alloué. Pour atteindre l'objectif de -40% il faudrait intensifier la diminution d'émission. Or, et même si le laps de temps considéré est trop court pour en tirer des conclusions, force est de constater que ces émissions ont eu tendance à augmenter depuis 2015. Par ailleurs, on peut penser que les réductions les plus « faciles » ont déjà été entreprises en début de parcours et qu'il sera donc de plus en plus difficile pour un pays d'intensifier ses efforts au fur et à mesure des années.

2/ Le déploiement des ER va bon train. Parmi les filières énergétiques utilisées en Allemagne, ce sont elles qui progressent le plus. Les filières renouvelables dans la production d'électricité sont en hausse et occupent encore une place importante dans le TFC, en concordance avec les objectifs (14,9% en 2015). Leur développement dans le secteur des transports reste toutefois très timide (5,2%). Concernant les capacités installées, l'éolien et le solaire ont connu une explosion depuis 2010 (figure 73).

3/ Il sera difficile d'atteindre la diminution d'énergie primaire attendue (-20% entre 1990 et 2020), bien que l'Allemagne a déjà amorcé une diminution de sa consommation en énergie primaire qui n'est pas négligeable (-7,6% entre 2008 et 2015). Pour atteindre ses objectifs, il faudra que son taux de diminution double en seulement 5 ans. Or, dans le cinquième rapport de « suivi de la transition énergétique »³⁹⁶ mis à jour en décembre 2016, ces valeurs auraient tendance à stagner, et sont même en légère hausse en 2015 (+0,9%).

³⁹⁶ BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi « Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

La figure 72 montre que la courbe d'évolution de consommation d'énergie primaire ne suit pas la courbe de décroissance fixée par le plan de transition énergétique allemand. En 2016, plus de 13 000 PJ ont été consommés, soit plus de 8% de ce qui aurait dû être consommé.

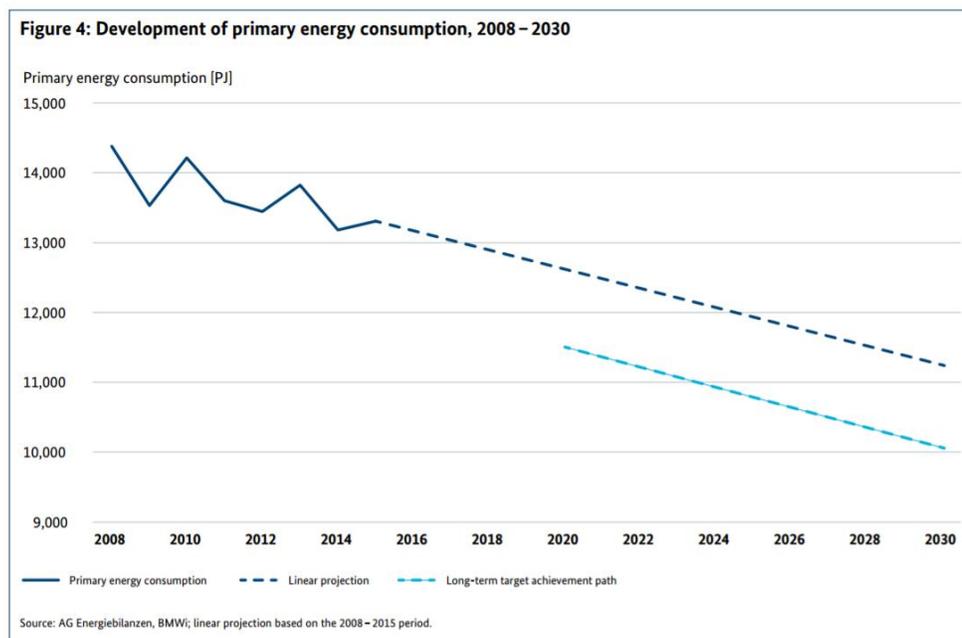


Figure 72. La diminution de la consommation d'énergie primaire n'est pas suffisante par rapport aux objectifs de l'Energiewende

Source : BMWI, 2016 : 12³⁹⁷

i) Son faible taux de diminution en énergie primaire est lié à la productivité énergétique qui reste en deçà des objectifs attendus. L'Allemagne réussit à améliorer son efficacité énergétique de 1,3% par année. Mais on reste en deçà du taux de 2,1% par an

³⁹⁷ BMWI. (2016). *Green Paper on Energy Efficiency* (p. 7;). Berlin: BMWI. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/green-paper-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=3

préconisé par le plan. « Pour atteindre cet objectif, la productivité énergétique finale doit s'accroître en moyenne de 3,3 % par an jusqu'en 2020 » (BMWI, 2016 : 9).

ii) Concernant les EF, certains résultats en 2014 sont cohérents avec les objectifs, tels que la réduction de la consommation d'énergie nucléaire et de gaz. Concernant les capacités installées d'énergie nucléaire (figure 73), celles-ci diminuent fortement grâce à la fermeture de réacteurs. En contrepartie, il y a une hausse de la consommation du pétrole et une hausse de la capacité installée de la houille suite à la fermeture de ces centrales nucléaires.

« Entre 2000 à 2013, le pays a réussi une formidable évolution en multipliant par quatre sa production d'énergies renouvelables. Dans le même temps, il diminuait de 43% l'électricité nucléaire et de 2% celle d'origine charbon / lignite. Mais entre 2010 et 2013, la production d'énergie à base de charbon a continué son ascension et augmenté de 23 TWh » (EnR, smart city, 2014)³⁹⁸.

³⁹⁸ EnR, Smart City. (2014). *Du charbon aux énergies renouvelables*. Netseenergy. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://si.netseenergy.fr/charbon-aux-energies-renouvelables/>

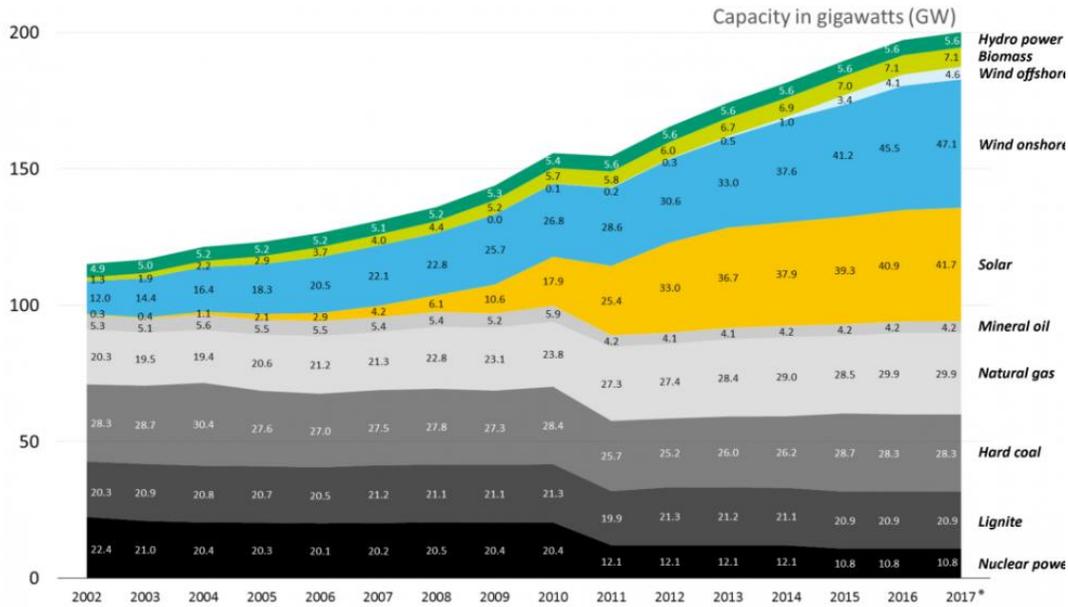


Figure 73. Evolution des capacités installées des énergies mobilisées en Allemagne. Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017³⁹⁹

Cependant, ces résultats favorables n'ont pas été accompagnés d'une baisse de la consommation d'énergie primaire attendue.

4/ D'un point de vue économique, le pays a atteint un record absolu en matière d'exportation d'électricité⁴⁰⁰. Cette forte croissance des exportations pourraient expliquer la croissance du PIB et l'écart important entre les objectifs de réduction de la consommation du charbon et sa consommation réelle, malgré le déploiement des ER et de l'efficacité énergétique. Le PIB est en hausse, mais connaît un ralentissement de sa croissance (seulement +1,7% en 2015).

³⁹⁹ Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

400

4/ Enfin, concernant le découplage croissance économique / diminution des déchets, celui-ci peut être considéré comme absolu depuis 1990 car on voit une augmentation de la croissance économique et une diminution des émissions GES. Toutefois, en 2015, l'Allemagne a connu une croissance de +1,7% tandis que les émissions de GES diminuaient de moins de 1% (Hartmut Lauer, 2016). Par ailleurs, il y a un très léger découplage entre la croissance économique (courbe « GDP » de la figure 74) et la consommation énergétique (courbes « Gross power consumption » et « primary energy consumption » de cette même figure) qui aurait tendance à s'annuler compte tenu de la tendance à la hausse de la consommation d'énergie primaire globale depuis 2014. Toutefois, nous apportons un bémol face à ce constat en rappelant que cette question de découplage n'a de sens qu'abordée à une échelle mondiale. En effet, sauf à considérer tous les déchets associés au flux de matière et d'énergie (les *throughput*) depuis l'extraction, la production et les transports des biens importés, on ne peut évaluer de réel découplage.

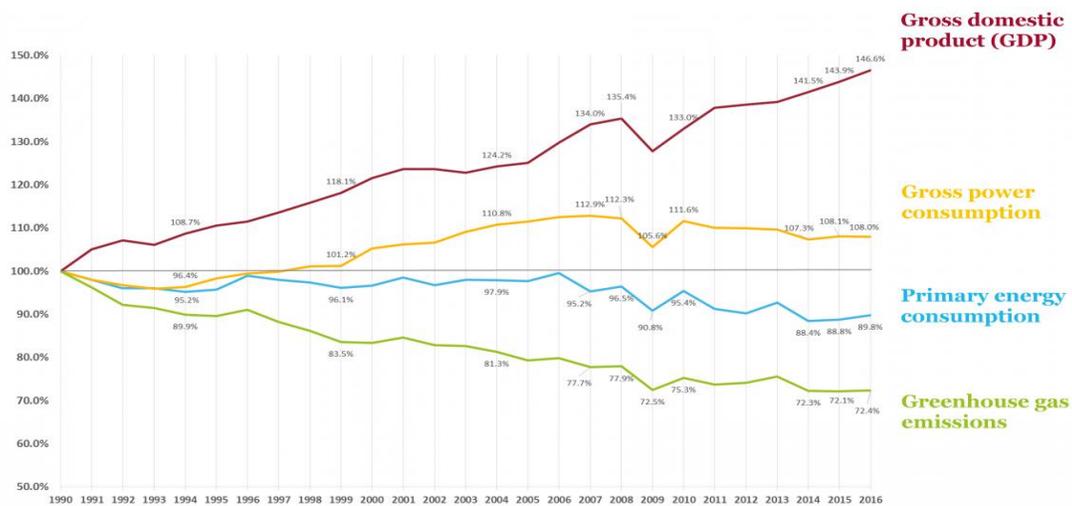


Figure 74. Evolution du PIB, de l'énergie primaire et des GES depuis 1990.
 Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017⁴⁰¹

⁴⁰¹ Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

A la lumière de la figure 74, le bilan que l'on peut tirer de tout cela est le suivant.

- L'objectif de découplage entre le maintien d'une croissance économique et une réduction des déchets GES et nucléaires est atteint. L'Allemagne connaît la croissance économique la plus importante d'Europe avec en 2016, +1,9% de croissance, qui est « sa meilleure performance en 5 ans » (Nienaber & Nasr, 2017)⁴⁰². Son plan de sortie du nucléaire est en marche et sa réduction des GES atteint près des ¾ de son objectif en 2020.
- Cependant, les objectifs quantitatifs fixés par l'Energiewende en 2020 semblent difficilement atteignables. Il semblerait que le déploiement de la croissance allemande ne semble pas pouvoir se passer des fossiles, et sa consommation d'énergie primaire et d'électricité est en trop faible baisse.

⁴⁰² Nienaber, M., & Nasr, J. (2017). *La croissance en Allemagne à 1,9% en 2016, au plus haut en 5 ans*. *Capital.fr*. Consulté le 27 septembre 2017, à l'adresse <http://www.capital.fr/economie-politique/la-croissance-en-allemande-a-1-9-en-2016-au-plus-haut-en-5-ans-1199297>

3.5 Discussion

*« La perfection des moyens et la confusion des buts
semblent caractériser notre époque. »*

Albert Einstein

Nous constatons que sur la période 2008-2016, la croissance est au rendez-vous, les GES diminuent, l'efficacité augmente, le déploiement des ER avance à bonne allure, la consommation d'énergie finale diminue, et le nucléaire ferme peu à peu ses portes. Le vrai succès de cette transition réside dans le déploiement des ER, qui se rapproche très étroitement de l'objectif 2020 avec sa part croissante dans la consommation d'énergie finale (14,9% en 2015 sur 18% en 2020), la consommation d'électricité (31,6% sur 35%) et la consommation de chaleur (13,2% sur 14%) (Figure 71).

Voici un tableau récapitulatif des résultats de l'Energiewende :

Période	Avancement	Objectifs		
	2008 - 2016	1990 – 2020	2008-2020	2022
PIB	+8%	N/A	N/A	N/A
GES	-22,2%	-40%	N/A	N/A
Efficacité énergétique	-1,3%/an	N/A	-2,1% / an	N/A
Part des ER dans la TFC	en lien avec les objectifs (voir Figure 81)	N/A	18%	N/A
TPES	-6,9%	N/A	-20%	N/A
Électricité	-4%	N/A	-10%	N/A
Nucléaire	29 / 37 centrales fermées. 11 000 MW actifs			Arrêt total

Tableau XIX. Tableau récapitulatif des résultats d'avancement et des objectifs

Cependant, la part croissante des ER ne s'est pas accompagnée d'une réduction de la consommation d'énergie telle que préconisé par le plan. On s'aperçoit que ni la trajectoire de réduction de GES, ni celle de la réduction du TPES, ni la consommation d'électricité, ne respectent les objectifs fixés pour 2020. Concernant la production d'électricité, celle-ci connaît un pic historique en 2016, s'élevant à 648,3 TWh, ce qui représente une augmentation de 8% par rapport à 1990. Ce qui a pour conséquence un taux d'efficacité énergétique en deçà du taux prescrit (-1,3%/an au lieu de 2,1%/an) et une courbe de GES loin d'obéir à l'objectif de réduction de 40% d'ici 2020. Par ailleurs, la part des énergies fossiles, principaux responsables du réchauffement climatique, domine de loin l'approvisionnement énergétique allemand. L'approvisionnement en pétrole n'a cessé d'augmenter et la consommation énergétique dans le secteur des transports suit la même trajectoire.

L'avenir reste ouvert, mais au rythme actuel, les objectifs du plan allemand risquent de ne pas être atteints et, plus fondamentalement, une transition énergétique sans décroissance ne semble pas sur le point de se réaliser dans ce pays pourtant plus avancé dans cette voie que bien des autres. Pour quelles raisons? À ce stade du processus et compte tenu des données dont nous disposons, nous ne pouvons que formuler des hypothèses. **Une de ces hypothèse serait que le plan de transition énergétique allemand est limité dû au fait qu'il a en quelque sorte ignoré ou négligé les difficultés identifiées au chapitre 2.** Pour appuyer notre hypothèse, nous allons prendre appui sur ce que nous avons identifié, au chapitre précédent, comme les principaux défis d'une transition énergétique sans décroissance. Ceci nous conduit à formuler quatre hypothèses principales expliquant pourquoi les objectifs du plan allemand ne semblent pas pouvoir pas pouvoir être atteints, au moins dans les délais prévus.

1/ **La croissance économique en Allemagne est en partie assurée par une croissance historique des exportations en électricité**, ce qui explique en partie la hausse de la production d'électricité de 8% depuis 1990 (Figure 75). Cependant, cela ne s'est pas accompagné d'une diminution de l'approvisionnement en EF. La croissance économique de

l'Allemagne **ne participerait donc pas à une diminution soutenable ni des fossiles ni des GES sur son territoire et à l'échelle du globe, ce qui fait que le découplage recherché est limité.**

2/ Les efforts entrepris dans la recherche d'efficacité énergétique, dont les grandes stratégies sont d'une part relatives **au couplage et à l'électrification des secteurs**, et d'autre part à une certaine **dématérialisation du secteur énergétique par la gestion numérique**, n'ont pas les résultats attendus. Le rendement énergétique global n'est que de 1,3%/an contre 2,1% recherché par le plan de transition. Logiquement, la croissance de la production en électricité s'explique en partie par cette stratégie d'électrification (la première explication est relative aux exportations accrues, expliquées en 1/ ci-dessus). Mais force est de constater qu'elle ne s'est accompagnée d'une diminution suffisante ni dans l'approvisionnement de chaleur ni dans celle de carburant pour les transports. Les approvisionnements ont même augmenté au lieu de diminuer. Ces résultats peu satisfaisants pourraient s'expliquer par des **effets rebonds dans la recherche d'efficacité énergétique concernant l'approvisionnement en chaleur, des défis techniques tels que le stockage d'électricité et des limites physiques auxquelles le progrès technique fait face.**

3/ Loin des objectifs de réduction de 20% d'ici 2020 (seulement 7,6% de réduction en 25 ans), force est de constater que le déploiement des ER, qui va bon train, n'a pas engendré l'effet de décroissance énergétique prévu par le plan de transition. Pourquoi? Outre le fait de penser que ce déploiement n'a finalement permis que de soutenir une croissance économique par le biais d'une balance commerciale très positive, nous supposons dans ce mémoire que **ledit déploiement d'énergies renouvelables ne peut être assuré que par un apport énergétique fossile abondant, en raison de leur rendement énergétique faible. Pour ainsi dire, les ER entretiennent avec les EF une relation de complémentarité plutôt que de substitution.**

4/ Outre les limites physiques et économiques que nous venons d'évoquer, des limites socio-économiques pourraient compléter nos tentatives d'explication concernant la difficulté actuelle

du plan de transition énergétique allemand à atteindre ses objectifs. La dynamique économique actuelle de nos sociétés fait en sorte que la valeur économique domine, et donc que **le prix relativement bas des EF empêche leur diminution.**

3.5.1 La croissance économique s'appuie sur une croissance de la consommation énergétique

La croissance de la balance commerciale s'explique en partie par des exportations accrues en électricité (Figure 75).

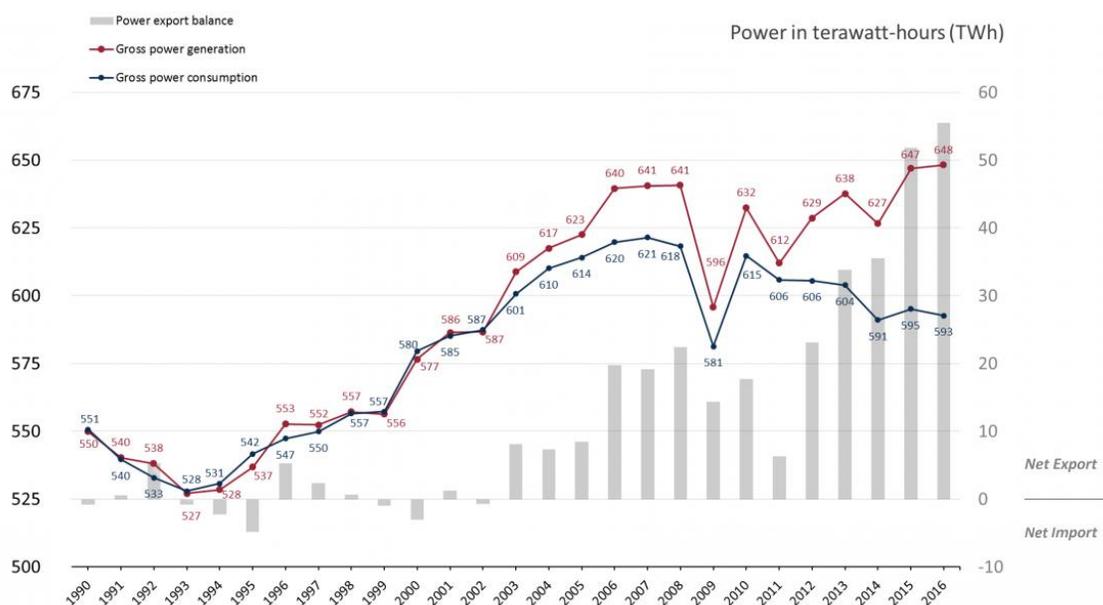


Figure 75. Évolution de l'exportation en électricité

Source : Appunn, Bieler & Wettengel, 2017

La croissance économique allemande aurait donc besoin d'une hausse des exportations d'électricité, *i.e.* d'une croissance en production d'énergie.

Cependant, a) cette balance commerciale positive s'accompagne d'une hausse des importations :

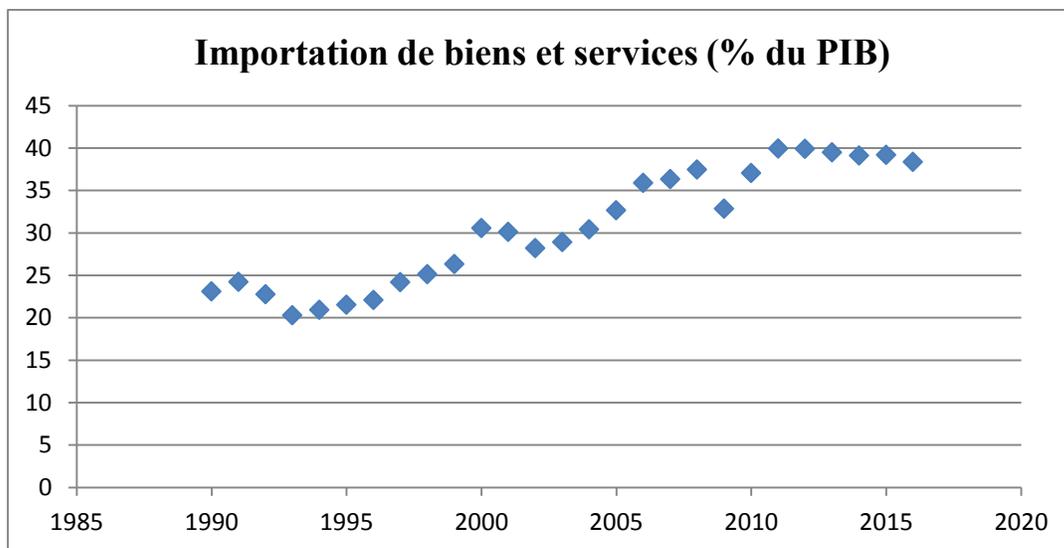


Figure 76. Part croissante des importations dans le PIB allemand

Source : World Data Bank, 2017⁴⁰³

Elle est donc dépendante énergétiquement d'autres pays; pour preuve, son approvisionnement en gaz représente presque totalement (93%) ses importations depuis la Russie, la Norvège et les Pays-Bas. De nouveaux projets d'importation de gaz (Figure 59) nous montrent que l'Allemagne n'est pas prête à s'orienter vers une politique d'autosuffisance énergétique.

⁴⁰³ World Data Bank (2017), *Importations de biens et de services (% du PIB)*, API_NE.IMP.GNFS.ZS_DS2_fr_excel_v2 [Excel]. Consulté le 10 octobre 2017 à l'adresse <https://donnees.banquemonde.org/indicateur/NE.IMP.GNFS.ZS>

Par ailleurs, b) l'électricité est de plus en plus produite grâce aux ER, mais la majeure partie est encore assurée par les EF. Ainsi, l'Energiewende permet une croissance économique grâce à des exportations qui s'appuient sur un apport énergétique renouvelable et fossile.

On aurait pu espérer que la croissance de la production d'électricité à partir des renouvelables diminue l'usage des fossiles, et de ce fait les émissions de GES. La part des ER dans le secteur de l'électricité atteint 31,6% en 2016 avec près de la moitié provenant de l'éolien terrestre (Hartmut Lauer, 2016). Les ER (éolienne et solaire) couvrent ainsi 1 kW d'électricité sur trois, et entrent en concurrence avec les centrales électriques conventionnelles car, étant devenues des technologies matures, leur prix est plus faible. Malheureusement, ce développement s'est accompagné d'une augmentation de la production d'électricité à partir de charbon. En 2014, bien que l'utilisation de la houille ait diminué de 20% par rapport à 2000 (Boulangier, V., 2015), l'exploitation du lignite a augmenté de 3%.

Ainsi, face à une augmentation de 529% en ER en près d'un quart de siècle (1990-2014), et à une mince diminution des EF de seulement 10% durant cette même période, on pourrait penser que l'utilisation grandissante des énergies renouvelables ne servirait qu'à augmenter les exportations qui ont pour but d'augmenter la balance commerciale et dynamiser l'économie de croissance allemande, qui est d'ailleurs « à son plus haut depuis quatre ans », à +1,7% (LeMonde.fr, 2016)⁴⁰⁴. Ce qui soulève un paradoxe. Car face à ce constat, **il semblerait que le développement des ER soit devenu un objectif de rendement économique en dépit de l'objectif premier de réduire ce RC que l'on voit, à l'échelle du globe, augmenter.**

⁴⁰⁴ LeMonde.fr. (2016). *La croissance allemande à son plus haut depuis quatre ans*. Le Monde.fr. Consulté le 10 août 2017, à l'adresse http://www.lemonde.fr/economie/article/2016/01/14/la-croissance-allemande-a-son-plus-haut-depuis-quatre-ans_4847264_3234.html

Au-delà de la nécessaire exploitation des EF pour maintenir la croissance économique, peut-on penser, à la lumière de notre analyse du chapitre 2, que la difficulté à diminuer leur usage réside dans :

- La difficile « dématérialisation » de l'économie?
- La difficulté à atteindre les objectifs en matière d'efficacité due à une limite théorique infranchissable?
- Aux effets rebonds?
- A cette relation de complémentarité qu'elles entretiennent avec les ER?

C'est ce que nous allons détailler dans les paragraphes suivants.

3.5.2 La dématérialisation de l'économie est-elle un leurre?

3.5.2.1 La numérisation du secteur énergétique est-elle vraiment une solution durable?

Il y a cette volonté de sobriété énergétique grâce à une gestion moins énergivore et intelligente du système d'approvisionnement en énergie. C'est ce qu'on peut appeler, dans le discours dominant, la dématérialisation de l'économie dans le secteur de l'énergie.

Le gouvernement mise d'abord sur un marché en électricité 2.0 interconnecté grâce à la *Loi sur la numérisation* qui soutient des « systèmes de mesure intelligents » (Gabriel, 2016)⁴⁰⁵. Le marché de l'électricité 2.0 représente non plus un marché de capacité avec des centrales conventionnelles de capacité très puissante mais plutôt un marché interconnecté pour répondre

⁴⁰⁵ Sigmar Gabriel. (2016). *Le Bundestag adopte une vaste réforme du marché de l'électricité et l'adapte à la transition énergétique*. Consulté à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2016/20160624-gabriel-bundestag-verabschiedet-reform-strommarkt.html>

à la demande des clients de façon juste, « ni plus, ni moins », afin d'éviter de gaspiller de l'énergie inutilement.

Au-delà du secteur de l'énergie, le gouvernement appuie une nouvelle industrie, l'industrie 4.0. Pour passer à une industrie 4.0, il faut entamer la numérisation ou encore la dématérialisation, c'est-à-dire « le processus par lequel on passe d'une technologie matérielle à une technologie numérique » (Romain, 2017)⁴⁰⁶. Car de manière générale, la dématérialisation repose sur des machines transparentes, qu'on appelle aussi technologie de l'information et de la communication.

« Dans l'industrie 4.0, la production est étroitement liée de manière intelligente aux technologies les plus modernes de l'information et de la communication. Cela permet la fabrication, au meilleur prix, de produits sur mesure, adaptés aux besoins spécifiques des clients et de grande qualité. Voici à quoi ressemble l'usine de l'industrie 4.0 : des machines intelligentes coordonnent de manière indépendante les processus de fabrication, des robots de service coopèrent intelligemment avec les ouvriers du montage, des véhicules de transport intelligents (sans conducteur) accomplissent de manière autonome des travaux de logistique. L'industrie 4.0 détermine toutes les étapes de la vie d'un produit : depuis l'idée initiale, le développement, la fabrication, l'utilisation et la maintenance jusqu'au recyclage. » (BMW, 2016)⁴⁰⁷

La numérisation est un outil qui se place donc dans la stratégie de dématérialisation de l'économie. Or, nous avons vu au chapitre 2 qu'elle ne permettait que partiellement de compenser le capital naturel, car celui-ci entretient une relation de complémentarité avec le capital artificiel. La « dématérialisation » de l'économie grâce aux services numériques serait

⁴⁰⁶ Romain, B. (2017). *La pollution numérique est-elle connue et comprise de tous? Les Mondes Numériques*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://lesmondesnumeriques.wordpress.com/2017/02/14/la-pollution-numerique-est-elle-con nue-et-comprise-de-tous/>

⁴⁰⁷ BMW. *Industrie 4.0 ou la numérisation de l'économie*. BMW.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Artikel/Industrie/industrie-4-0-ou-la-numerisation-de-l-economie.html>

donc une idée fautive, car cette « activité de gestion de flux physiques » serait en fait produite par des machines qui nécessiteraient soit des flux de matière et d'énergie importants tel que le capital humain (Jancovici, 2013) soit des flux d'énergie pour l'extraction des minerais, le transport, le commerce, le stockage de données et sa maintenance. Par exemple, le stockage s'établit dans des « data center » ou usines de stockage très polluantes⁴⁰⁸, selon le Global e-Sustainability Initiative (GeSI) (Romain, 2017). La production des supports électroniques nécessite des minerais et des terres rares très polluants, qui plus sont souvent extraits en Chine ou doivent être transportés jusqu'en Chine. Par ailleurs, la maintenance de ce monde digital représente 7% des demandes en énergie mondiale. Ou encore, « les impacts d'un internaute par an sont estimés à 250 kilogrammes de CO₂, 300 kWh d'électricité ou encore à 3 000 L d'eau douce » (Romain, 2017).

Ainsi, le projet de numérisation de l'économie demande de tels investissements que même si l'entreprise est de grande taille, elle pourra difficilement en assurer seule le financement » (CCFA, 2016)⁴⁰⁹.

1.1.1.11 Le recyclage est nécessaire mais il ne réduit que partiellement l'usage du capital naturel

Par ailleurs, que faire des déchets? D'après l'analyse de Daly et de Roegen, le recyclage ne pourrait être la solution principale à notre système car si nous continuons de croître économiquement, alors l'ultime produit créé sera un déchet (2^{ème} loi) qui plus est sera inutilisable (seconde loi). Roegen mobilise « l'entropie » pour mettre de l'avant « l'inévitable

⁴⁰⁸ Ces derniers comprennent « des kilomètres de câbles électriques, des centaines de servers ainsi que des systèmes de climatisation. »

⁴⁰⁹ CCFA (2016). *Le point sur le programme Industrie 4.0 en Allemagne - CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles*. Ccfa.fr. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.ccfà.fr/Le-point-sur-le-programme>

perte d'énergie, sous forme de chaleur résiduelle, qui survient à chaque fois que l'on transforme un type d'énergie en une autre. Lorsqu'il y a transformation, la concentration énergétique et la quantité de travail que cette énergie peut effectuer baisse⁴¹⁰ (Greer, 133). Ainsi, le recyclage, qui peut être imagé comme un processus de transformation inversée, n'est possible que par une perte d'énergie. On peut donc penser qu'il y a aura un moment où les déchets ne pourront plus être recyclés seulement grâce à un apport énergétique qui, dans un état de rendement décroissant, sera plus important que la quantité recyclée. Vu dans une perspective écologique, l'exploitation de l'énergie n'est pas un phénomène circulaire mais plutôt une relation à sens unique de transformation de ressources en déchet sans valeur.

3.5.3 Efficacité énergétique

3.5.3.1 Constat positif, mais insuffisant

Si l'on regarde les progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique en Allemagne, l'intensité énergétique « ne cesse de progresser », avec un gain d'énergie de presque 40% pour la même richesse créée (Figure 77). Par ailleurs, selon l'indice d'efficacité énergétique ODEX⁴¹¹ « qui mesure les progrès en efficacité énergétique au niveau de la demande » (Global Chance, s. d.)⁴¹², les gains en efficacité au niveau de la demande atteignent presque 20% entre 2000 et 2012 (Figure 78).

⁴¹⁰ Elle baisse car toutes les formes d'énergie sont « graduellement transformées en chaleur, et la chaleur en fin de compte devient si diffuse que l'homme ne peut plus l'utiliser » (Roegen, 64).

⁴¹¹ Indicateur développé dans le cadre du projet ODYSSEÉ (Global Chance, s. d.).

⁴¹² Global Chance. *Bilan de l'efficacité énergétique au niveau de la demande*. Consulté à l'adresse http://www.global-chance.org/IMG/pdf/HS4_Fiche09_p38-41.pdf

Le PIB de l'Allemagne ne cesse de progresser avec moins d'énergie

Intensité énergétique (consommation d'énergie par unité de PIB) dans plusieurs régions du monde, 1990-2014

Source : Enerdata Yearbook

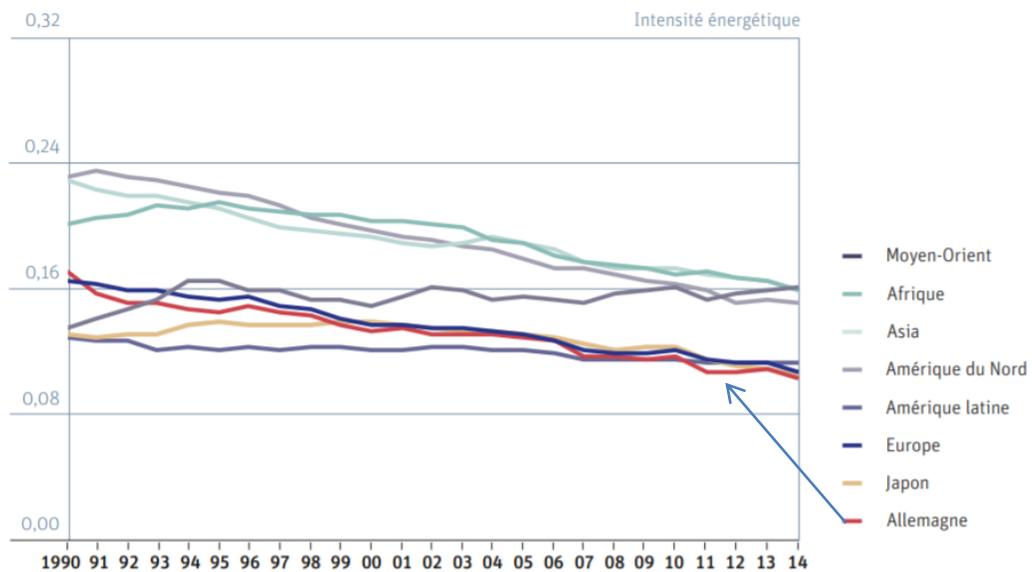


Figure 77. Intensité énergétique en Allemagne

Source: Morris, Pehnt, 2012⁴¹³

⁴¹³ Morris, G., & Pehnt, M. (2012). *Le PIB de l'Allemagne ne cesse d'augmenter avec moins d'énergie*. Drupal. Consulté le 10 août 2017, à l'adresse <https://book.energytransition.org/fr/infographic>

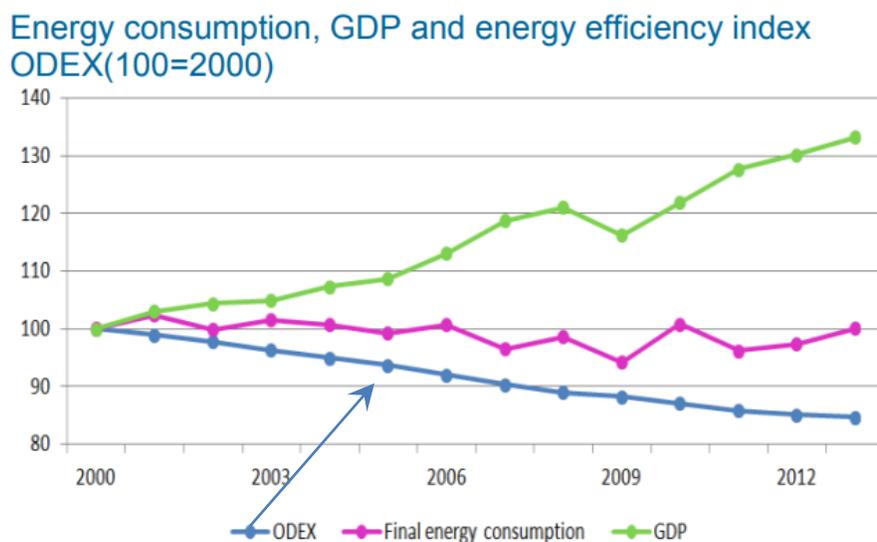


Figure 78. Mesure des progrès réalisés en Allemagne en matière d'efficacité énergétique (courbe ODEX) entre 2000 et 2013

Source : ADEME, 2015 : 1⁴¹⁴

On se rend compte que beaucoup d'efforts ont été entrepris depuis 1990 (figures 77 & 78) et que ces efforts ne semblent pas s'arrêter **dans le secteur du transport, industriel et résidentiel** (Figure 79).

⁴¹⁴ ADEME (2015). *Energy Efficiency Country Profile: Germany*, Enerdata. Consulté à l'adresse <http://www.odyssee-mure.eu/publications/profiles/>

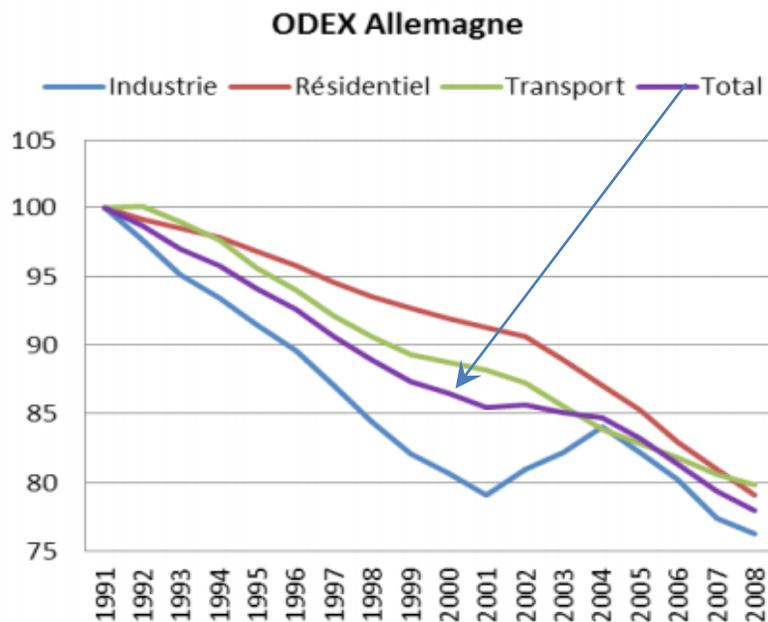


Figure 79. Mesure des progrès réalisés en Allemagne en matière d'efficacité énergétique (courbe ODEX) entre 1991 et 2008

Source : Chappoz, 2013 : 10⁴¹⁵

Face à ce constat qui nous semble très positif, la consommation en énergie primaire entre 2008 et 2015, n'a baissé que de 7,6% en 7 ans, ce qui est loin de l'objectif de réduction de 20% en 2020. L'efficacité énergétique en Allemagne est par ailleurs limitée à 1,3% par année entre 2008 et 2015 (Figure 71), soit 0,8 point de pourcentage en deçà des objectifs fixés (2,1% par année). Ainsi, « pour atteindre cet objectif, la productivité énergétique finale doit s'accroître

⁴¹⁵ Chappoz, L. (2013). *Les politiques d'efficacité énergétique en France et en Allemagne : quand deux voisins empruntent des chemins différents* (p. 10). Paris: Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI). Consulté à l'adresse

http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/STUDY0413_LC_France%20Allemagne.pdf

en moyenne de 3,3 % par an jusqu'«en 2020 » (BMWI, 2016 : 9)⁴¹⁶. En termes de réduction de la consommation, il faudrait plus que doubler nos efforts en seulement 5 ans.

3.5.3.2 Pourquoi ce retard?

3.5.3.2.1 *Relation de complémentarité avec le capital naturel*

Si l'on s'en tient à notre analyse du chapitre 2, on pourrait émettre l'hypothèse que l'efficacité, soit la recherche d'amélioration du rendement énergétique, ne peut que partiellement substituer le capital naturel. Il y a une relation de complémentarité entre ces deux types de ressources. Ainsi, l'efficacité énergétique n'entraînerait pas de réelle diminution de la consommation énergétique.

Par ailleurs, aurait-on atteint une limite asymptotique qui nous empêche d'améliorer notre performance énergétique?

3.5.3.2.2 *Limite théorique asymptotique*

D'après la Figure 80, on observe une stagnation des progrès en efficacité énergétique dans des branches **du secteur industriel**, après les années 2000.

⁴¹⁶ BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

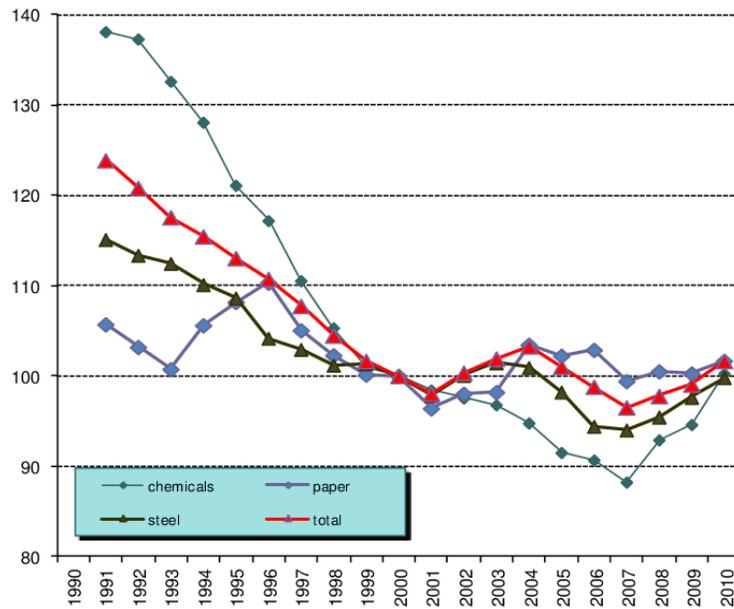


Figure 80. Stagnation des progrès en efficacité énergétique dans le secteur industriel allemand

Source : Schломann & Eichhammer, 2012 : 17⁴¹⁷

Si l'efficacité a effectivement atteint une limite physique asymptotique, on ne pourra pas plus réduire les pertes, ce qui serait contradictoire avec l'objectif de réduire la consommation énergétique. Cette limite asymptotique n'est pas mentionnée dans le plan de transition énergétique, ce qui peut être explicable compte tenu des efforts en matière d'efficacité qui restent à faire. Mais celle-ci est bien réelle.

Le graphique suivant révèle en effet une diminution de l'intensité énergétique globale entre 1991 et 2009 **pour l'Europe** des 15 et l'Europe des 27.

⁴¹⁷ Schломann, B., & Eichhammer, W. (2012). *Energy Efficiency Policies and Measures in Germany* (p. 15-17). Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Consulté à l'adresse http://file:///C:/Users/ochamakh/Downloads/Energy_Efficiency_Policies_and_Measures_in_Germany.pdf

Nous observons qu'en 1991, nous voyons une grande différence en intensité énergétique entre ces deux groupes. Cela pourrait s'expliquer par le fait que puisque l'Europe des 15 est plus riche que l'Europe des 27 (en PIB par habitant), plus de financement est attribué à la recherche en efficacité énergétique pour les 15, et donc que les résultats sont visibles plus rapidement.

Or, il apparaît, qu'au fur et à mesure des années, l'écart d'intensité énergétique s'amointrit. Pourquoi ? D'abord, on pourrait se dire que l'Europe des 27 a rattrapé le niveau économique de l'Europe des 15 et donc, qu'ils arrivent au même niveau d'intensité énergétique. Aussi, d'après les pentes des deux courbes (représentées en pointillée), on voit un ralentissement dans leur diminution à partir de l'an 2000. Dans les deux cas, on peut se demander si en effet, nous n'atteignons pas une limite dans notre recherche en efficacité énergétique.

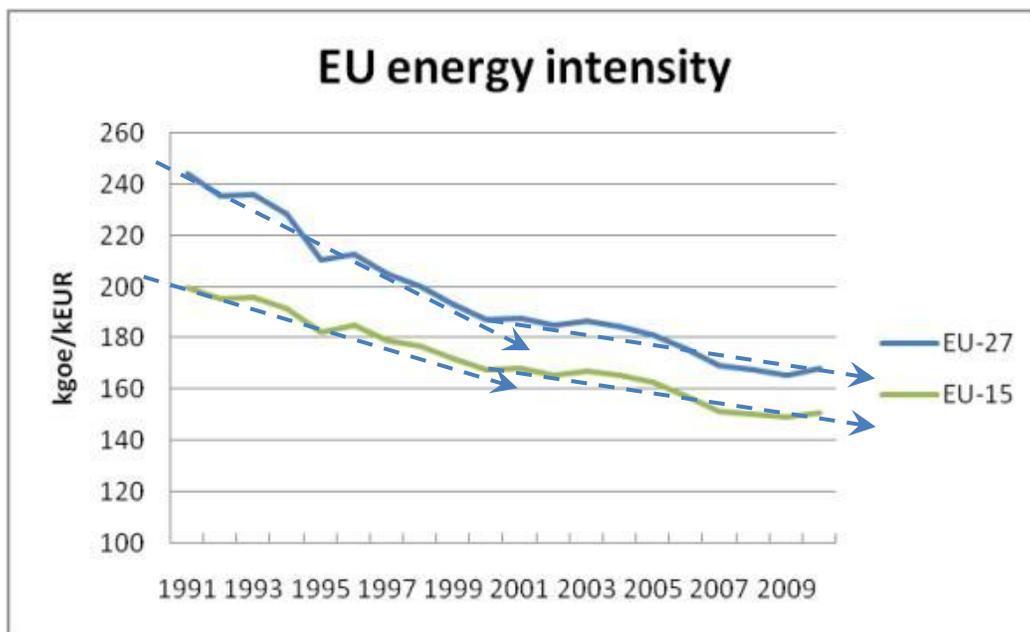


Figure 81. L'intensité énergétique diminue. Source : Vmisenergy, 2012⁴¹⁸

⁴¹⁸ Vmisenergy. (2012). *Energy intensity* | vmisenergy. Vmisenergy.com. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://vmisenergy.com/tag/energy-intensity/>

Par ailleurs, il nous apparaît probable que les gains d'efficacité (estimés à 16 milliards d'euros en 2015) sont compensés par une augmentation de la consommation de la ressource considérée, parce que l'Allemagne reste une société de croissance. Ce sont les effets rebonds.

3.5.3.2.3 L'efficacité énergétique est limitée par les effets rebonds

Si on applique l'effet rebond à l'économie en général, alors on peut penser que l'amélioration de l'intensité énergétique serait un facteur d'augmentation du PIB, donc la production. En trente ans, l'intensité énergétique a certes augmenté, c'est-à-dire que la quantité d'énergie nécessaire pour produire 1 euro de PIB a certes diminué de 25 %, mais le PIB, lui, a augmenté de plus de 90 %, d'où l'effet rebond.

En fait, « établir l'efficacité énergétique comme un modèle de rendement et d'activité » est incompatible avec les objectifs de réduction GES puisque c'est bien ce modèle de rendement d'activité qui provoque une augmentation de l'activité économique et donc un effet rebond indirect. Ainsi, on constate un écart entre la baisse de la consommation d'énergie primaire réelle et les objectifs. De ce fait, même les GES ont tendance à ne pas prendre la trajectoire voulue.

Tel que le mentionne l'Energiewende dans le rapport *Green Paper on Energy Efficiency* (BMWI, 2016 : 20), il pourrait y avoir des effets rebonds, directs et indirects, dans différents secteurs.

1.1.1.11.1 Effet rebond dans le secteur des transports?

Le graphique suivant nous montre les gains en efficacité énergétique obtenus dans le secteur des transports, ici mesuré par l'intensité énergétique. Il s'avère que l'énergie demandée en transport par rapport à la production de PIB diminue drastiquement :

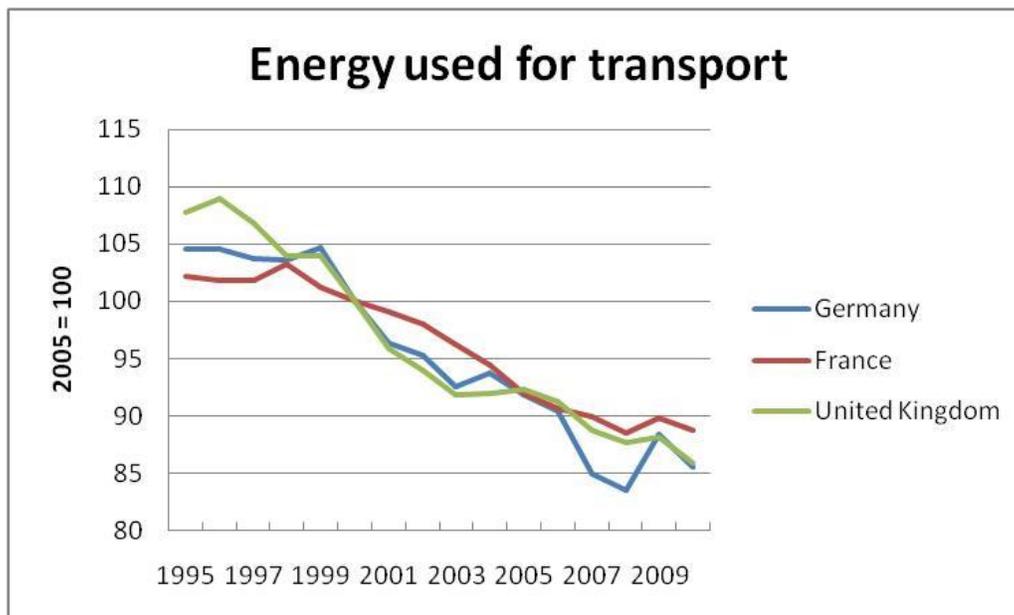


Figure 82. Evolution de l'énergie utilisée dans le secteur des transports en Allemagne (courbe bleue)

Source: Vmisenergy, 2012⁴¹⁹

Or, on voit que malgré la recherche d'efficacité dans le secteur des transports, la consommation a augmenté, passant de 54222 Mtoe en 2013 à 54882 en 2014. Par rapport à 2008, année de référence, la consommation a augmenté de 2,6%. Si on regarde de plus près, on s'aperçoit, d'après le tableau suivant, que le bio fioul recule. Seul le pétrole augmente. On se demande alors si c'est une question : a) de non-substituabilité possible entre le bio fioul et le pétrole, compte tenu du très faible rendement énergétique du bio fioul; b) de couplage sectoriel avec électrification des transports inefficace ; c) d'effet rebond ; d) de tous ces facteurs à la fois.

⁴¹⁹ Energy efficiency | *vmisenergy*. (2012). *Vmisenergy.com*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://vmisenergy.com/category/energy-efficiency/>

	Pétrole	Gaz Naturel	Bio fioul	Electricité	Total [ktoe]
2014	50763	449	2790	997	54882
2013	20036	453	2702	1031	54222
2008	48997	594	2944	958	53493

Tableau XX. Evolution de la consommation énergétique dans le secteur des transports (AIE, 2017)⁴²⁰

Ainsi, d'ici 2030, le gouvernement allemand veut « bannir » la vente de voitures à essence. (Mercier, 2012)⁴²¹.

Par ailleurs il n'y a apparemment « pas de solution » pour réduire les émissions des camions pour le moment, mais nous en avons pour les voitures», d'après le discours de Rainer Baake, vice-ministre de l'économie allemande (Eisenstein, 2016)⁴²². Par exemple, il existe des progrès en efficacité énergétique dans les moteurs diesel de la part des grands concessionnaires auto allemand Audi, BMW, Mercedes (Ministère de Ressources naturelles

⁴²⁰ AIE. (2017). *Iea.org*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?year=2014&country=GERMANY&product=RenewablesandWaste>

⁴²¹ Mercier, F. (2016). *L'Allemagne bannira la Vente de voitures à essence en 2030*. Autonet.ca. Autonet. Consulté 10 octobre 2017, à l'adresse <http://www.autonet.ca/fr/2016/06/22/lallemagne-bannira-la-vente-de-voitures-a-essence-en-2030>

⁴²² Eisenstein, P. (2016). *All New German Cars Must Be Emission-Free by 2030* | *TheDetroitBureau.com*. *Thedetroitbureau.com*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <http://www.thedetroitbureau.com/2016/06/all-new-german-cars-must-be-emission-free-by-2030/>

Canada, 2014)⁴²³. Pour ce qui est du moteur électrique, le « moteur-roue » est en fort progrès de recherche, notamment par l'institut Fraunhofer (Cousineau, 2013)⁴²⁴.

1.1.1.11.2 Des effets rebonds indirect dans l'exportation

En 2015, l'Allemagne ne remplissait pas les conditions pour atteindre ses objectifs en termes d'efficacité à l'horizon 2020 en raison d'une diminution trop faible, et même récemment à une croissance de 0,9% de la consommation en énergie primaire, due partiellement à des exportations record d'électricité.

« Le découplage de la croissance économique et de la consommation d'électricité n'est pas assez rapide. [...]En 2015, avec moins de 3,4 % de réduction de la consommation, la trajectoire est inférieure à l'objectif. Dans les 5 prochaines années, il va donc falloir consommer 8 TWh de moins par an (l'équivalent de la production d'un an d'un réacteur de 1 GWe), pour espérer pouvoir atteindre l'objectif de moins 62 TWh par rapport à 2008. » (Hartmut Lauer, 2016).

Dans cette perspective, on pourrait penser que les gains d'énergie établis par les énergies renouvelables et les politiques d'efficacité en général sont en fait mobilisés pour développer d'autres activités telles que l'exportation. C'est donc ici un effet rebond indirect.

⁴²³ Ministère de Ressources naturelles Canada. (2014). *Le bon sens au volant*. Consulté à l'adresse http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oe/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_12_f.pdf

⁴²⁴ Cousineau, J. (2013). *Les Instituts Fraunhofer, En Allemagne, Travaillent Fort Sur Le Moteur-Roue*. Eco-Energie A Montréal. Consulté 10 août 2017, A L'adresse <Http://Eco-Energie-Montreal.Com/Post/Instituts-Fraunhofer-Moteur-Roue-Pierre-Langlois%E2%80%8f/>

Cela voudrait dire alors que l'amélioration de la productivité entraîne plus de consommation? Que l'objectif d'amélioration de 2,1% entraînerait avec lui plus de consommation? De 1,6 ou de 2,1% par année, cette efficacité risque d'entraîner un effet rebond.

Ainsi, pour des raisons économiques, les filières renouvelables ne jouent donc que partiellement le rôle de substitut aux énergies fossiles et ne participent donc pas à la réelle diminution des GES. Mais même avec une économie qui ne serait plus productiviste, nous pensons qu'elles ne pourront non plus, pour des raisons physiques, jouer un rôle de substituabilité.

Par ailleurs, sur le plan politique, et tel que nous le soulèverons dans le paragraphe 3.5.5, des réglementations pourraient contraindre les secteurs – en particulier le secteur industriel – de faire des efforts en matière d'efficacité.

3.5.4 Les renouvelables sont complémentaires aux fossiles

Notre hypothèse est la suivante : **les ER ne peuvent se substituer aux EF car il existe une forme de complémentarité entre les technologies utilisées pour mobiliser les ER et les EF.** Cette hypothèse s'appuie sur notre analyse du chapitre 2, résumé au tableau IX à savoir :

- 1/ Le flux des ER est intermittent,
- 2/ Leur énergie est non stockable,
- 3/ Leur rendement énergétique est faible / Leur coût énergétique est élevé
- 4/ Le déploiement rapide et à grande échelle peut entraîner un risque de cannibalisme énergétique.

1.1.1.12 Les « joies » de l’intermittence

L’intermittence des ER (éolienne et solaires) implique qu’il est nécessaire « de compenser les fluctuations de la production électrique des renouvelables » par des charges de bases⁴²⁵ provenant d’énergie fossiles et particulièrement des centrales thermiques et électriques charbonneuses.

Le graphique ci-dessous montre une journée où un déficit de production des ER intermittentes (éolien et solaire) entraine une production accrue en énergie conventionnelle.

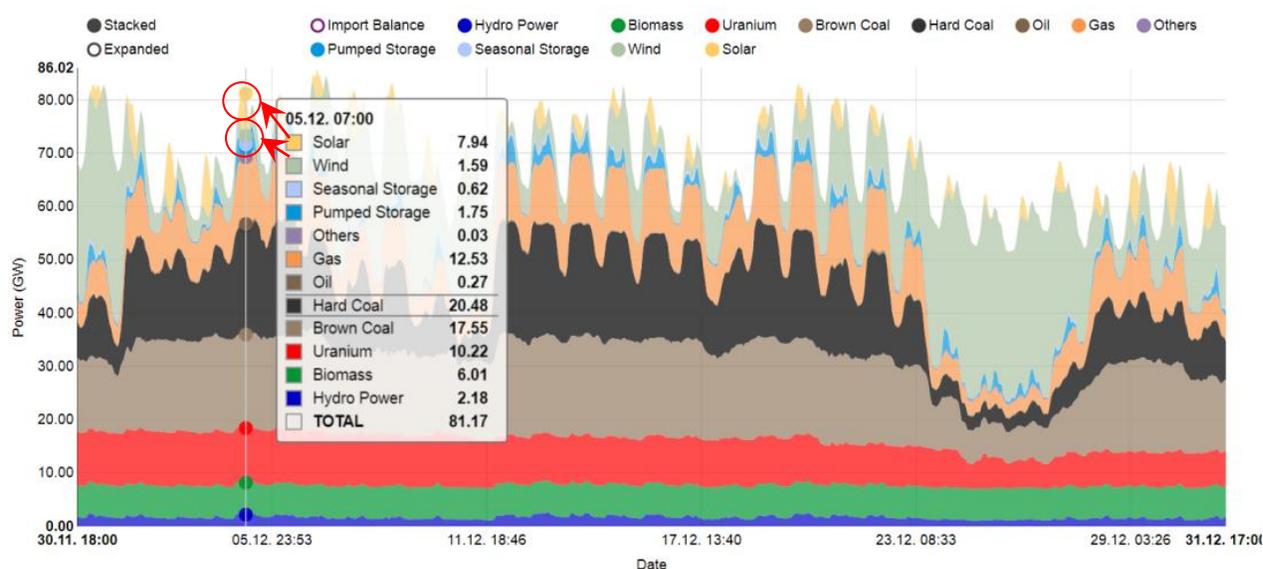


Figure 83. Type d’énergie consommé le 5 décembre 2016

Source : Fraunhofer⁴²⁶

⁴²⁵ « Les charges de base des centrales électriques sont celles qui couvrent la quantité minimale d’électricité nécessaire aux besoins du pays 24 heures sur 24 » (Morris et Penht, 343 :357). En Allemagne, la quantité d’électricité minimale requise est autour de 40 GW (Morris et Penht, 2015).

⁴²⁶ Fraunhofer. (2017). *Electricity production in Germany | Energy Charts. Energy-charts.de*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse <https://www.energy-charts.de/power.htm?source=all-sources&month=12&year=2016>

5 décembre 2016 – 7 am	Production d'électricité [GWh]	Puissance installée [GW]
Eolien sur terre + hors terre	1,59 (3,2%)	50,018 ⁴²⁷
Solaires (CSP et panneaux)	7,94 (19,3%)	41,2 ⁴²⁸

Tableau XXI. Production d'électricité des éoliens et du solaire le 5 décembre 2016 en Allemagne

Le 5 décembre 2016, en début de période hivernale donc, à cause d'une météo sans vent et peu de soleil, les éoliennes ont fonctionné à seulement 3,2% de leur capacité maximale et les panneaux solaires à 19,3%. Ces taux de fonctionnement très faibles pour l'éolien ont duré, comme il est indiqué sur la figure, près de trois semaines consécutives. Ce qui montre que, peu importe la capacité installée, c'est-à-dire le nombre d'éoliens et de panneaux solaires installés, l'Allemagne ne peut se passer des énergies fossiles.

1.1.1.13 Des problèmes de stockage ?

La relation de complémentarité s'observe même dans les systèmes de stockage entre les ER et un type d'EF particulier, le gaz. Dans le cas de surproduction, on convertit l'électricité renouvelable en hydrogène ou en méthane puis on l'injecte au réseau gazier. Ainsi, le gaz est

⁴²⁷ Global Wind Energy Council [GWEC]. (2017). *Global Wind Statistics 2016* (p. 2). Bruxelles: Global Wind Energy Council. Consulté à l'adresse :

http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf

⁴²⁸ IEA-PVS Reporting Countries, Becquerel Institute (BE), RTS Corporation (JP). (2017). *Snapshot Of Global Photovoltaic Markets 2016* (p. 10). Consulté à l'adresse : http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2016__1_.pdf

une ressource nécessaire pour supporter la production des ER, le but étant « d'utiliser cette technique à grande échelle pendant la prochaine décennie » (BMW, s.d.)⁴²⁹.

Mise à part cette technique de stockage, aucune discussion relative au coût énergétique et aux enjeux techniques du développement des autres formes de stockage des ER à grande échelle n'a été relevée. En fait, cette question est quelque peu mise de côté du fait qu'elle n'est pas considérée d'actualité :

« La plupart des experts estiment qu'à mi-parcours, le besoin de stockage d'énergie sera minime en Allemagne. [...] Il n'y aura pas de marché de technologies de stockage conséquent avant 2030, [car] [...] il n'y aura pas de demande importante en termes de stockage avant que la part des énergies renouvelables en Allemagne n'atteigne 40 pour cent, objectif susceptible d'être atteint au mieux en 2020. » (Morris et Penht, 2012 : 79).

La relation de complémentarité ER et EF est en fait dissimulée dans le discours sur le besoin d'une énergie fossile pour « faciliter » la transition. Selon notre analyse, nous pensons que nous en aurons toujours besoin pour maintenir un taux de croissance positif ou même pour atteindre un état stationnaire, sans décroissance préalable.

D'autre part, compte tenu du fait que les ER ne sont pas stockables, on constate qu'il est difficile pour les ER de pénétrer le marché des transports. On observe que la part des énergies renouvelables dans le secteur des transports, en 2015, a affiché une légère baisse par rapport à 2014. Avec 33,8 TWh, elles représentent environ 5,2 % du total de la consommation d'énergie finale. La part des biocarburants s'établit à 4,6 % et les autres ER pour alimenter les voitures

⁴²⁹ BMW. *Les pierres angulaires de la sécurité énergétique*. BMW.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Dossier/energies-conventionnelles.html>

électriques à 0,6 %. (BMWI, 2016 : 6)⁴³⁰. Face à ce résultat peu convaincant, l'autre solution est donc de remplacer le carburant fossile par du gaz naturel liquéfié.

1.1.1.14 Un coût énergétique élevé

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les EROI des ER plus faibles que les EF montrent que pour répondre aux besoins énergétiques humains, il faudra mobiliser plus d'énergie en amont que celle requise pour les énergies fossiles. Ce qui implique un coût énergétique plus élevé.

Or, aucune donnée énergétique n'est apportée pour rendre compte du flux d'énergie nécessaire à l'utilisation des technologies de substitution, depuis l'extraction des terres rares pour leur fabrication, le transport, la mise en action jusqu'à leur entretien. Un élément que le plan allemand ne prend pas en compte est les coûts énergétiques totaux associés au déploiement des ER : Quel apport énergétique le plan de transition requiert-il vraiment? D'où proviennent les ressources premières utilisées par l'Allemagne? L'Allemagne se fournit-elle en Chine? Si nous faisons face un problème de RC mondial et à l'épuisement des fossiles et des métaux, pourquoi ne pas tenir compte de ce coût énergétique?

Cet apport énergétique en amont est particulièrement présent dans le cas de l'électrification des transports dont les conditions préalables pour générer de l'électricité à partir de vent ou de soleil nécessitent un ré-outillage des usines, le développement de batteries à grande échelle, et un système de réseau intelligent « smart-grid » (Fridley cité dans Heinberg & Lerch, 2010 : 233). Quel apport énergétique doit être mobilisé pour transformer ce secteur? Les défis relatifs

⁴³⁰ BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

aux batteries de stockage et les 430 bornes de recharge rapide (BMW, 2015 :12) ont un coût énergétique non-négligeable, que pourtant le plan allemand ne prend en compte.

1.1.1.15 Remplacer l'énergie fossile...par d'autres fossiles!

Si nous émettons l'hypothèse que les ER ne sont pas substituables aux EF compte tenu de leur plus faible densité, alors il est logique de constater, d'après la figure 82, que la diminution des capacités installées des centrales nucléaires (indiquée par une flèche) des périodes 2003-2004, 2011 et 2015 ait donné lieu à une augmentation de la capacité installée des centrales à charbon, lignite (« brown coal »), et houille (« hard coal »), durant la même année ou avec une année de décalage :

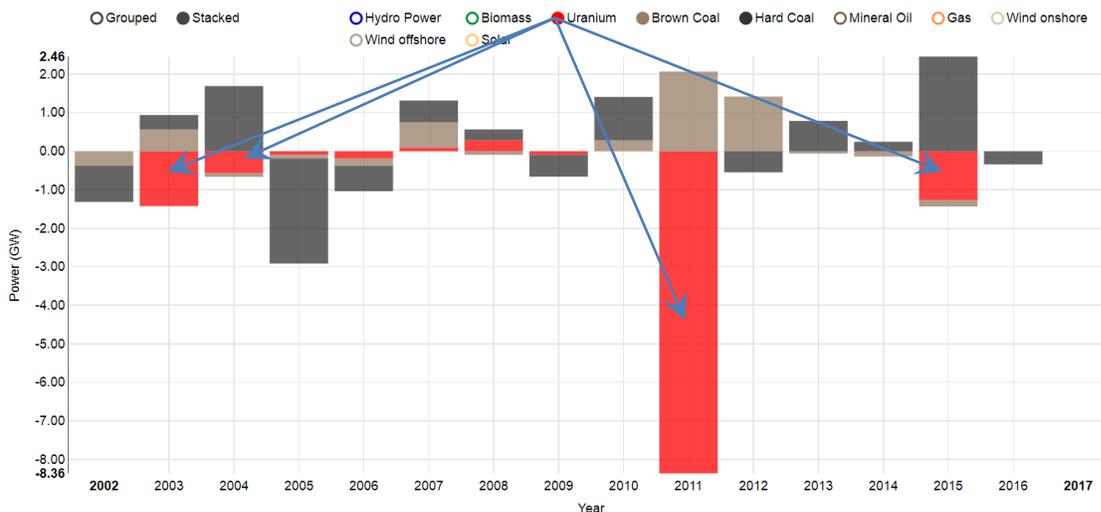


Figure 84. Evolution des capacités installées de houille, lignite et d'uranium

Source : Fraunhofer, 2017⁴³¹

⁴³¹ Fraunhofer. (2017). *Installed power in Germany | Energy Charts*. Energy-charts.de. Consulté 9 août 2017, à l'adresse https://www.energy-charts.de/power_inst.htm?year=all&period=annual&type=inc_dec

En effet, d'après la figure 83, les périodes de croissance de l'utilisation du charbon correspondent aux trois périodes de fermeture de centrales nucléaires (indiquées par des flèches), avec parfois une année de décalage. La fermeture des centrales nucléaires créent un « choc » dans le système énergétique qui ne peut être absorbé instantanément par les centrales ER. Sur du plus long terme, les capacités installées des centrales à charbon ne diminuent pas.

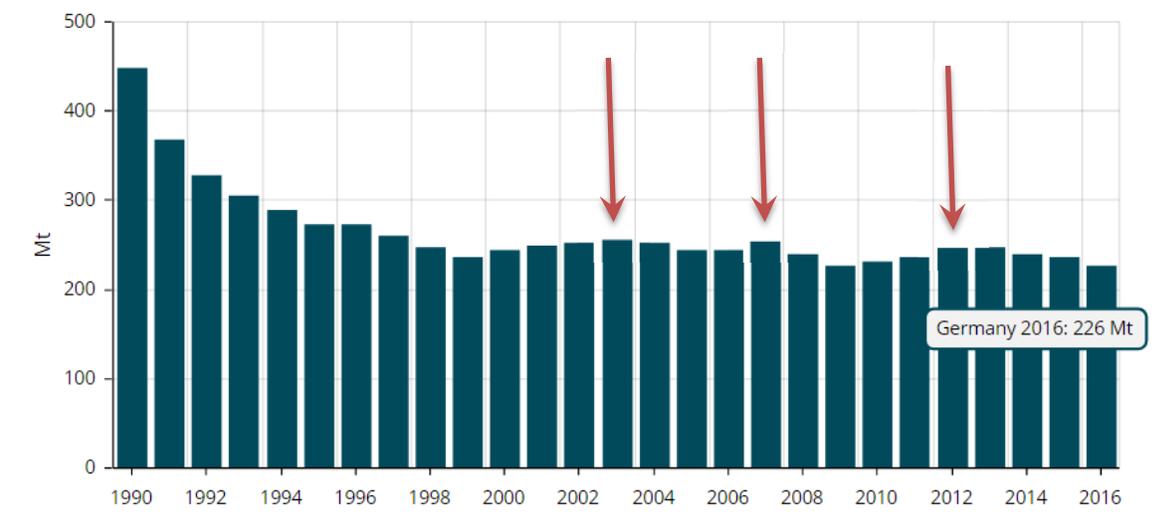


Figure 85. Pic de production du charbon correspondant aux périodes de fermeture des centrales nucléaires

Source : Enerdata, 2017

Ce phénomène de substitution d'EF par d'autres EF s'observe aussi avec la montée accrue de l'utilisation du gaz naturel. Comme il est moins polluant et que ses centrales assurent une énergie de « back-up » aux ER plus flexibles que les centrales nucléaires ou les centrales à charbon, le gaz est considéré comme une ressource énergétique « essentielle » de substitution aux centrales à charbon. Mais cette stratégie entre en contradiction avec cette volonté de sécuriser l'approvisionnement énergétique en Allemagne, car 93% du gaz qu'elle utilise est importé depuis la Norvège, les Pays-Bas et la Russie. Elle se rend ainsi dépendante d'une source d'énergie qu'elle ne détient qu'à 7% sur son territoire.

1.1.1.16 Un risque de cannibalisme énergétique ?

Si la montée en puissance des technologies vertes (Boulangier, 2015) en Allemagne, (529% d'augmentation dans le TPES entre 1990 et 2014) crée un risque de cannibalisme énergétique, l'Energiewende établit un «couloir de croissance », c'est-à-dire un rythme de croissance des ER durable établi à «2,5 gigawatts par an pour l'éolien et pour le PV. Si ce niveau est dépassé, les réductions prévues sont relevées » (Morris et Penht, 2012 : 116).

Aussi, l'ordonnance de durabilité pour la biomasse aborde le problème de sa production durable (Morris, Pehnt, 2012 : 166), qui s'apparente à notre définition du cannibalisme énergétique : à quel rythme peut-on développer la biomasse sans que celle-ci ne cannibalise l'énergie fournie par les terres agricoles? Un plafond fixé à 4 millions d'hectares d'ici 2020 est toutefois mis en place par mesure de sécurité environnementale pour ne pas empiéter sur des terrains agricoles⁴³². La hausse de l'utilisation de la biomasse dans le programme de transition ne doit pas non plus engendrer d'augmentation des importations.

Par ailleurs, on voit des signes de cannibalisme dans l'industrie des panneaux solaire, où on parle de « pénurie » de la ressource en silicium. « Ces dix-huit derniers mois, le prix du kilogramme de silicium a été multiplié par 10. » (Bauer, 2007)⁴³³. Aussi, le renchérissement des matières premières, aluminium, acier, et cuivre, tire aussi les prix à la hausse (Bauer, 2007)

⁴³² « L'expansion de la production de biomasse ne doit pas entrer en conflit avec la sécurité alimentaire, le droit l'alimentation, la protection de l'environnement et de la nature » (déclaration du ministère allemand de l'Environnement, cité dans Morris & Penht, 2012 : 61).

⁴³³ Bauer, A. (2007). *Éolien, solaire : de multiples goulets d'étranglement*. lesechos.fr. Consulté 10 août 2017, à l'adresse https://www.lesechos.fr/24/10/2007/LesEchos/20032-155-ECH_eolien--solaire---de-multiples-goulets-d-etranglement.htm#lx7s3KlvFYg2jsuK.99

D'autre part, est-ce une volonté politique d'obtenir un déploiement d'ER si important, compte tenu du fait que les ressources en houille en Allemagne sont en train de s'épuiser et qu'il serait stratégique de les remplacer le plus rapidement possible ? Le contexte d'épuisement des ressources est cependant différent pour l'exploitation du lignite, bien plus polluante, mais dont les quantités accessibles pourraient être exploitées encore pendant 10 ans (Boulanger, 2015).

Outre les éléments empiriques à l'appui de chacune des trois hypothèses, on peut souligner le fait que les trois problèmes soulevés par ces hypothèses ne semblent pas être considérés dans le plan allemand. Ni les limites de l'efficacité énergétique, ni les effets rebonds, ni les faiblesses des ER, ne semblent vraiment être pris en considération. Tout se passe comme s'il y avait une sorte de déni de la part des Allemands, qui « se bercent d'illusions » (Theurillat-Cloutier, 2016).

Le plan allemand néglige par ailleurs certains aspects sociaux (précarité énergétique) et politiques (souveraineté énergétique) de la transition.

3.5.5 Interprétation socio-politique des limites du plan allemand sur la recherche de l'efficacité

Le cadre d'étude de ce mémoire nous invite à considérer que s'il existe des limites à l'augmentation de l'efficacité énergétique, celles-ci sont d'ordre physique et économique.

Les contraintes physiques sont la limite maximale théorique à l'efficacité énergétique intrinsèque à chaque secteur et la relation de complémentarité que le progrès technique entretient avec les EF.

Les contraintes économiques sont les effets rebonds desdits secteurs et les coûts économiques du progrès technique, comme par exemple un coût d'investissement trop important pour mettre en place l'industrie 4.0 et un système de recyclage efficace.

Ainsi, il y aurait lieu de penser que ces projets ne sont pas encore suffisamment encouragés.

3.5.5.1 Un besoin d'éducation sur le sujet de la transition

Pour le BMWI, il y aurait un manque de suivi et d'information sur le sujet de la transition énergétique qui reste une notion vaste et complexe. Ainsi, concernant l'efficacité énergétique par exemple, le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie a lancé une consultation publique sur le Livre vert sur l'efficacité énergétique, qui a débuté le 12 août 2016. Un an plus tard, le 12 avril 2017, il a été adopté le quatrième Plan d'action national pour l'efficacité énergétique (NEEAP) pour rendre compte des avancées (Brigitte Zypries, 2017)⁴³⁴. Par ailleurs, le gouvernement explique en partie la difficulté d'atteindre les résultats de l'efficacité énergétique escomptés par le fait que le Plan national d'action en matière d'efficacité énergétique (NAPE) n'a été « mis en œuvre et engagé » qu'en 2015, soit très récemment (BMWI, 2016 : 11)⁴³⁵.

⁴³⁴ Brigitte Zypries. (2017). *La recherche sur l'énergie est un élément stratégique de la transition énergétique*. Consulté à l'adresse <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170412-zypries-energieforschung-ist-strategisches-element-der-energiewende.html>

⁴³⁵ BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi «Transition énergétique »* (p. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté à l'adresse http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10

1.1.1.17 La réglementation pour la recherche en efficacité énergétique reste essentielle

Partant du constat que ces projets d'efficacité énergétique ne sont pas suffisamment encouragés, Morris et Penht insistent sur **la nécessité de la dimension politique**. Pour eux, « les politiques relatives à l'amélioration de l'efficacité énergétique sont en place mais restent en deçà de ce qui est théoriquement possible, voire nécessaire pour le succès de la transition énergétique » (2012 : 34). Il faut ajouter que les objectifs de l'UE pour les émissions de carbone (une réduction de 20 pour cent d'ici 2020 inférieurs au niveau de 1990) et les énergies renouvelables (20 pour cent d'énergies renouvelables dans la consommation en 2020) sont contraignants, alors que celui qui concerne l'efficacité énergétique (une réduction de 20 pour cent de la consommation d'énergie primaire en 2020) ne l'est pas (2012 : 40). Certains observateurs soutiennent donc que **seules de futures réglementations engendreront une nouvelle tendance à l'augmentation de l'efficacité énergétique** (Commission européenne, 2017)⁴³⁶ car elles obligeront les entreprises, par la contrainte législative, à rendre leurs systèmes plus efficaces. En effet, une des raisons pour lesquelles il y a un refus de décroissance énergétique est que les grands producteurs d'énergie n'ont aucun intérêt à une baisse de leur production. On peut alors se demander si l'efficacité énergétique, restant dans la logique coût-bénéfice évoquée précédemment, ne serait, dans une moindre mesure, calculée pour répondre aux intérêts des grands producteurs énergétiques, acteurs clefs de la croissance économique. Il y aurait là une tension entre les producteurs d'énergies qui ne voient pas d'intérêt à réduire leur production, et les consommateurs qui eux souhaitent réduire leur facture.

⁴³⁶ Commission européenne. (2017). *L'objectif d'augmenter l'efficacité énergétique de 20 % d'ici à 2020 en passe d'être atteint, et même dépassé* (p. 3). Bruxelles. Consulté à l'adresse http://file:///C:/Users/ochamakh/Downloads/MEMO-17-162_FR.pdf

3.5.5.2 Les grosses machines entre les mains de géants...ou l'Energiewende ?

Tel qu'on l'a vu, l'Energiewende prône l'autonomie grâce à l'énergie des citoyens pour les citoyens. Or, l'essentiel des champs d'éoliennes off-shore par exemple sont entre les mains de firmes multinationales (Bezatz, 2017)⁴³⁷.

Ainsi, dans ce paragraphe, il s'agit en quelque sorte de savoir si les grandes entreprises (productrices d'énergie et des secteurs associés) ne sont pas les faux-alliés de la transition énergétique ou bien si le rythme de la transition exige de pouvoir mobiliser rapidement beaucoup de capitaux, ce que probablement seul l'État et les grandes entreprises peuvent faire.

3.5.5.2.1 *Système centralisé ou décentralisé?*

Cette question jaillit sur la scène du débat qui met en jeu la décentralisation du système énergétique. Celui-ci oppose a) les défenseurs d'un système « très décentralisé de petites structures de production qui, dans l'idéal, appartiendraient aux citoyens pouvant ainsi assurer leur autonomie énergétique » (Deshaies, 2014), et qu'ils considèrent plus efficace qu'un système centralisé (Morris & Penht, 2012 : 81); et b) les défenseurs dudit système centralisé qui encouragerait plutôt l'approvisionnement énergétique provenant de grandes centrales (Morris, Penht, 2012 : 117) gérées par de grands groupes.

⁴³⁷ « EDF enrichit son portefeuille éolien dans le cadre de son plan stratégique CAP 2030, qui prévoit en particulier de doubler ses capacités dans les énergies renouvelables à l'horizon 2030. Sa filiale EDF Energies nouvelles (EDF EN) a annoncé, mardi 25 avril, être entrée « en négociations exclusives » avec les actionnaires majoritaires de Futuren (ex-Theolia) pour racheter le spécialiste français de l'éolien. Une acquisition qui lui permettra notamment de se développer sur le marché allemand » Bezatz, J. (2017). *EDF s'ouvre une porte sur l'éolien en Allemagne*. Le Monde.fr. Consulté 10 août 2017, à l'adresse http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/04/26/edf-s-ouvre-une-porte-sur-l-eolien-en-allemande_5118013_3234.html#wgpCqoFP05Ia0uOO.99

Si l'on pense que les grandes entreprises productrices d'énergie sont les faux-alliés de la transition énergétique, cet objectif de décentralisation permettrait à l'Allemagne de se détacher de ces grandes firmes qui détiennent les techniques les plus coûteuses, telles que les éoliennes off-shore. Il semblerait en effet que l'éolien terrestre est beaucoup moins cher à installer que l'éolien offshore (Morris et Penht, 2012) car celle-ci requiert des techniques d'installation très coûteuses. Par ailleurs, si on installait des éoliennes terrestres adaptées⁴³⁸ au faible vent du sud (les éoliens allemands sont installés dans le Nord), il n'y aurait pas besoin d'installer des lignes ultra haute tension depuis les éoliennes off-shore jusqu'au Sud.

Cependant, sur le plan politique, la décision du ministre de l'économie Sigmar Gabriel, en juillet 2016, **de faire diminuer les aides publiques au développement des ER** a donné un coup de frein au développement des projets à petite échelle.

Un des constats que l'on peut évoquer est que, malgré les avantages de l'éolien terrestre dont la gestion peut revenir à des collectivités locales (Morris, Penht, 2015), les projets éoliens offshore font un pas de géant en Allemagne : « Le groupe danois Dong a remporté trois champs : OWP West (240 MW), Borkum Griffgrund West 2 (240 MW) et Gode Wind (110 MW). EnBW, énergéticien allemand, a quant à lui remporté le gigantesque champ de He Dreiht de 900 MW » (Mer et Marine, 2017)⁴³⁹.

⁴³⁸ L'industrie éolienne a mis au point ces dernières années des turbines particulières avec des mâts plus hauts et des lames plus longues, conçues spécialement pour des endroits où le vent est faible, comme dans le sud de l'Allemagne.

⁴³⁹ Mer et Marine. (2017). *Eolien offshore : L'Allemagne attribue les premiers parcs sans aucune subvention. Transition Énergétique*. Consulté 10 October 2017, à l'adresse <http://www.transition-energetique.org/2017/04/eolien-offshore-l-allemande-attribue-les-premiers-parcs-sans-aucune-subvention.html>

Cette nouvelle loi sur les énergies entraînerait donc un déséquilibre entre des collectivités locales qui ont besoin de subventions publiques et les grands industriels qui sont déjà largement subventionnés.

3.5.5.2.2 *Que penser de la loi EEG ?*

Rappelons que, par rapport à un système de quotas comme aux E-U qui oblige les fournisseurs à acheter un quota d'ER mais dont le type d'ER sera acheté en fonction du prix le moins cher (l'éolien est donc toujours privilégié), **la politique de tarif de rachat** mise en place par la loi EEG engage le déploiement de tous les types d'ER, et permettent donc la diminution de leur prix en général.

D'une part, nous pensons que cette politique concorde avec la politique mise de l'avant par l'Energiewende qui est d'améliorer l'autonomie grâce à l'énergie des citoyens pour les citoyens. Effectivement, la politique de tarif de rachat permet d'annuler les économies d'échelles souvent acquises par les grands groupes et donc d'offrir une concurrence plus juste vis-à-vis des petits producteurs. Ceci étant, le gouvernement soutient que les ER éoliens et photovoltaïques sont devenus aujourd'hui des technologies assez matures pour ne plus avoir besoin d'un soutien tel que leur apportait la loi EEG de 2000.

D'autre part, dû au lourd prélèvement EEG, prélèvement qui rappelons-le sert à « compenser les tarifs d'achat des ER » (Boulanger, V., 2015), il y a une forme de précarité énergétique dont le plan ne semble pas se soucier. De plus, ce prélèvement est en hausse en 2016 et 2017, « à respectivement 6,35 et 6,88 ct/ kWh » (Boulanger, 2015).

Les raisons de cette hausse sont dues :

1/ Aux indemnités importantes mises en place lors de l'adoption de la loi EEG qui visaient à encourager le développement des ER. Celles-ci sont versées aux ER déjà construits et ne peuvent être revue à la baisse, en « raison du principe de protection des droits acquis et de la confiance légitime » (BMWI, 2015 : 8).

2/ A la baisse des cours de l'électricité en bourse qui réduit également les recettes de ces installations existantes, ce qui accroît les besoins d'aide.

3/ Au coût élevé du développement des éoliennes en mer (BMW, 2015 : 8).

Un des effets de la loi EEG sur le marché de l'électricité est qu'elle a fait « baisser les prix du marché de gros et a augmenté ceux du marché de détail » (Morris & Penht, 2012 : 118). Le libre marché de l'électricité est très bénéfique pour les industries exemptées de la surtaxe EEG qui achètent sur le marché de gros et non sur le marché de détail. Par contre, c'est le phénomène inverse du côté des ménages et de l'industrie « non-exemptée du soutien aux énergies renouvelables », car sur le marché de détail, le prix de l'électricité reste « parmi les plus élevées d'Europe » (Lauer, 2015) :

« La surtaxe de l'EEG devient de plus en plus un enjeu de politique sociale – comment les personnes à faible revenu continueront-elles à payer leurs factures d'électricité? Les partisans des énergies renouvelables appellent de plus en plus à la suppression de l'exemption accordée à l'industrie intensive en énergie, compte tenu du fait qu'elle bénéficie déjà des prix du marché de gros. » (Morris & Penht, 2012 : 118).

Ainsi, « le coût de l'énergie verte est aujourd'hui surtout assuré par les acheteurs au détail allemands et les petites entreprises de manière disproportionnée par rapport aux grandes entreprises industrielles » (Morris & Penht, 2012 : 117). Pour enfoncer le clou, certains analystes pensent que les ER ne sont pas adaptées au marché spot. Car avec des prix spot en temps réel, il arrive parfois que les prix de l'électricité deviennent négatifs sur le marché de l'électricité, c'est-à-dire que les clients sont payés pour que les producteurs puissent écouler leur production d'électricité (Boulanger, 2015). Ainsi, face à ce constat assez paradoxal, pour s'assurer que le coût des ER diminue pour les citoyens, les tarifs de rachat de la politique EEG ont été « revus à la baisse » récemment (Morris et Penht, 2012 : 118).

3.5.5.2.3 *La logique coût-bénéfice et l'exonération de taxe des fossiles*

Enfin, sans prendre en considération les lois physiques de la thermodynamique, force est de constater que, dans une logique coût-bénéfice, où seul les prix fixés par le marché ont de la valeur, le prix bas du charbon justifie à lui seul son utilisation⁴⁴⁰ au point d'en oublier sa menace sur notre existence. Ainsi, la décarbonisation du système énergétique stagne, causant l'augmentation légère des émissions de gaz à effet de serre (GES). Si les aides publics sous forme d'exonération fiscale et de subvention pour aider ce secteur à fermer sont concevables, il nous apparaît illogique qu'il y ait des exonérations de taxe pour « l'extraction et le prélèvement d'eau » (Boulangier, 2015 : 29) pour l'industrie du lignite par exemple. En effet, celles-ci ne facilitent-elle pas des prix compétitifs et donc son utilisation? Son exploitation, qui plus est considérée sous un horizon de 400 ans d'après la fédération allemande du lignite, n'est-elle donc pas en contradiction avec la politique de transition énergétique?

⁴⁴⁰ « Les Verts ne s'y sont pas trompés qui ont tiré le signal d'alarme et soumis fin août 2016 un plan détaillé pour la sortie du charbon d'ici à 2040. Mais rien ne garantit que ce plan sera accepté et rapidement mis en œuvre par les partis de la grande coalition actuellement au pouvoir. » (Le monde.fr. (2016). *La croissance allemande à son plus haut depuis quatre ans*. *Le Monde.fr*. Consulté 10 août 2017, à l'adresse http://www.lemonde.fr/economie/article/2016/01/14/la-croissance-allemande-a-son-plus-haut-depuis-quatre-ans_4847264_3234.html).

Synthèse

*« La folie est de toujours se comporter de la même manière
et de s'attendre à un résultat différent »*

Albert Einstein

Le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources fossiles nous amènent à nous questionner sur une nécessaire transition énergétique. Le dépassement du taux de CO₂ dans l'atmosphère de 400 ppm en 2017, ainsi que le récent dépassement du pic de production du gaz et du pétrole, dans un contexte économique de croissance, nous montrent l'urgence d'amorcer cette transition. Puisque l'utilisation massive des énergies fossiles est la principale source responsable de ces deux phénomènes, il est important de la réduire. Dans une perspective de développement durable, les organisations internationales consacrées à ces enjeux, telles que le PNUD, le PNUE et le GIEC, recommandent aux gouvernements de mettre en place des incitatifs financiers et réglementaires (Audet, 2015) afin d'amorcer une transition énergétique qui reposent sur deux stratégies complémentaires:

1/ la première stratégie, connue sous le nom d'efficacité énergétique, est de réduire l'usage des fossiles en améliorant le rendement du système énergétique. Améliorer le rendement énergétique, c'est satisfaire les mêmes besoins avec moins d'énergie, ou satisfaire plus de besoins, mais avec la même énergie. Pour ce faire, il faudrait diminuer les pertes énergétiques lors de la conversion d'énergie en récupérant une partie de la chaleur perdue ou encore recycler des biens utilisés.

2/ La deuxième stratégie est de substituer aux fossiles des énergies renouvelables. Ces énergies renouvelables ne sont pas utilisables directement, il faut d'abord les capter puis les transformer par des technologies de pointe : centrale éolienne, panneau solaire, centrale solaire

à concentration thermodynamique, centrale biomasse, centrale géothermique, centrale hydroélectrique, centrale marémotrice. Ces technologies permettraient de produire de l'électricité, de la chaleur et de la vapeur d'eau afin d'approvisionner les différents secteurs que sont les transports, l'industrie, le commercial et le résidentiel.

Par ailleurs, on cherche à maintenir la croissance économique, considérée comme la condition nécessaire à l'accomplissement de la transition énergétique. En effet, organisations internationales, entreprises et gouvernements s'entendent sur le fait que la croissance économique permet une amélioration constante de la force de travail (amélioration des connaissances, efforts entrepris dans la R&D) et pousse au progrès technique. Grâce à celui-ci, le stock en capital matériel (métaux, ressources fossiles, usines de fabrication des panneaux solaires ou futures lignes de réseau nécessaires pour raccorder ces nouvelles énergies au réseau existant), qui est un stock épuisable et polluant, peut être remplacé par un stock en capital immatériel (logiciel, réseau intelligent, services) pour produire plus de richesse sans intrant énergétique supplémentaire.

Ainsi, la technologie est considérée comme la clef de voûte dans cette transition car elle est censée rendre possible un découplage entre la mobilisation de l'énergie fossile épuisable et la production de déchets polluants d'une part, et la croissance économique d'autre part.

Cependant, certains chercheurs contestent la possibilité de ce « développement durable » en y décelant des limites physiques et un manque de « considération écologique » (Audet, 2015). C'est ce que nous avons tenté de mettre en avant dans le chapitre 2 de ce mémoire.

D'abord, le courant de recherche de l'économie écologique soutient que le progrès technique a ses limites physiques dans le processus économique. À la lumière du premier principe de la thermodynamique auquel l'énergie que nous mobilisons obéit et qui postule que « rien ne se perd, rien ne se crée et tout se transforme », les chercheurs de l'économie écologique

soutiennent que le capital artificiel n'est autre que la transformation de ressources naturelles, qui, dans le secteur de l'énergie, sont représentées à plus de 80% par les énergies fossiles. En langage économique, le progrès technique et les énergies fossiles entretiendraient une relation de complémentarité et non de substitution, ce qui signifie que le capital artificiel, représenté surtout aujourd'hui par la technologie, aiderait à amoindrir les quantités d'énergie requises en amont jusqu'à un certain point, mais ne peut en aucun cas se substituer à elles. Autrement dit, les technologies que nous utilisons aujourd'hui reposent à leur tour sur un apport énergétique fossile. À partir de cette thèse, et en invoquant la 2^{ème} loi de la thermodynamique (entropie), Nicolas Georgescu-Roegen affirme qu'à très long terme, même sans un besoin de transition énergétique, la croissance économique infinie ne peut exister pas. Pour Herman Daly, nous pourrions tout au mieux vivre dans un régime stationnaire, donc à croissance économique nulle, si toutefois nous respectons une empreinte écologique soutenable⁴⁴¹.

On fait ainsi face à un paradoxe. Tout en étant responsable de notre utilisation grandissante d'énergie fossile non-renouvelable, dont l'accessibilité est de plus en plus difficile⁴⁴² et qui plus est la cause principale du réchauffement climatique, la croissance économique représente le facteur essentiel à l'accomplissement de la transition énergétique.

Par ailleurs, l'analyse économique soutenue par Stanley Jevons nous apprend que l'efficacité énergétique a un effet pervers sur la consommation de nos ressources, qualifié d'effet rebond. Celui-ci se définit comme le phénomène suivant : le gain d'énergie obtenu grâce à l'efficacité sera consommé pour autre chose. L'exemple des systèmes de climatisation en est un bon.

⁴⁴¹ L'empreinte écologique représente « la surface productive de sol et d'océans et mers nécessaires pour, à la fois, (1) fournir les ressources consommées par une population donnée, et (2) assimiler les rejets et déchets de ladite population ». http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_economie_conserv.pdf

⁴⁴² De par l'EROI décroissant, on se rend compte qu'il est de plus en plus difficile d'aller chercher ces stocks. Ce qui vient appuyer cette notion de limite à la croissance, car nous sommes en train d'épuiser les stocks sur lesquelles elle repose.

Autrefois, en raison de leur inefficacité, ces systèmes étaient trop coûteux et ne pouvaient être utilisés que dans des espaces où leur présence était nécessaire (hôpitaux, salle de cinéma). Avec l'avancée technologique, on a pu améliorer le rendement énergétique de la machine, la rendre plus petite, plus productive et réduire son coût. Ce qui a mené à une démultiplication de son usage dans tous les secteurs. Dans ce cas, l'effet rebond n'a pas annulé le gain énergétique, il l'a, comme l'affirme Jevons, largement dépassé.

Progrès technique et efficacité énergétique sont donc limités par des contraintes physiques et économiques. Que faire alors? C'est là qu'entre en jeu la deuxième stratégie, soit la substitution des énergies fossiles par des renouvelables. Peut-on détourner le regard de ce stock d'énergie fini et polluant, et l'orienter plutôt vers la captation d'un flux énergétique propre et abondant, le rayonnement de notre cher soleil, pour les 60 prochaines années?

Pour ce faire, il faudrait que ces énergies présentent au minimum le même rendement énergétique que celui des énergies fossiles afin qu'elles ne cannibalisent pas l'énergie nécessaire pour faire tourner la machine économique. Le PIB, tel que l'affirme Giraud, dépend à 60% de l'énergie. Pour certains chercheurs, il faudrait que les énergies disponibles aient un retour sur investissement énergétique (EROI) supérieur ou égal à 14 :1 pour permettre le maintien de nos sociétés de croissance.

Or, plusieurs facteurs font que les EROI des énergies renouvelables sont bien inférieurs. Partant d'un EROI standard ($EROI_{st}$) inférieur à celui des EF, les ER commencent leur course avec un train de retard. On a des $EROI_{st}$ compris entre 20-30 pour du pétrole conventionnel, 40-60 pour du gaz, et 80-100 pour du charbon. Pour du pétrole par exemple, cela signifie qu'un baril permet d'en extraire 20 à 30 autres. Concernant les ER, l'hydroélectricité a un EROI des plus avantageux, entre 50 et 100 :1 ce qui signifie qu'un 1 TWh d'électricité va permettre de produire 50 à 100 TWh d'hydroélectricité. Les éoliennes ont des EROI compris entre 15-20 :1 et les panneaux solaires ont des EROI compris entre 4 et 12 :1. Pour les panneaux solaires, cela signifie que toute l'énergie emmagasinée par un panneau solaire tout

au long de sa durée de vie, soit 20 ans en général, va permettre d'en produire 4 à 12 autres. Pourquoi une si grande différence?

1/ Leur densité. A la grande différence des stocks d'EF très denses, les ER sont des flux d'énergie diffus, qu'il faut pouvoir concentrer. Passer d'une énergie diffuse à une énergie concentrée demande un apport énergétique important. De ce fait, leur coût de fabrication et d'utilisation est élevé. A la lumière du coût énergétique des batteries s'ajoute le coût de fabrication des technologies de conversion d'ER en énergie utilisable. Ces technologies de pointe nécessitent des matériaux que l'on extrait du sol au moyen de machineries lourdes fonctionnant au carburant fossile. Cet argument est développé plus bas, au point 3/.

2/ Le cannibalisme énergétique. L'apport énergétique ainsi que les métaux requis pour fabriquer une centrale ER soulèvent alors un autre enjeu, celui du cannibalisme énergétique. Si l'on s'appuie sur l'exemple donné au chapitre 2, partant du résultat qu'il faudra attendre 2 ans avant qu'une centrale solaire soit énergétiquement rentable, le risque est donc d'avoir un rythme de développement de ces panneaux plus grand qu'1 centrale fabriquée tous les 2 ans, et donc d'empiéter sur l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins de nos sociétés.

3/ À cet handicap vient s'ajouter leur intermittence. Ces énergies ne sont pas disponibles en tout temps sur terre. Un panneau solaire ne peut récupérer l'énergie des rayons solaires que lorsque le temps est ensoleillé; une centrale éolienne ne peut récupérer l'énergie du vent que lorsque celui-ci exerce une certaine vitesse sur ses pales. Ce désavantage est physiquement représenté par un facteur de capacité, c'est-à-dire un taux de fonctionnement annuel bien inférieur à celui des fossiles. Pour amoindrir ce désavantage, il faut alors utiliser 10 à 20 fois plus de superficie pour générer autant d'énergie depuis les panneaux solaires que depuis une centrale à charbon. Cependant, on ne résout le problème qu'à moitié, car si le vent ne souffle pas ou le soleil ne brille, il n'y aura pas de production, peu importe la superficie utilisée.

4/ Leur stockage. Outre le désavantage d'être intermittentes, l'EROI des ER est amoindri par le coût de stockage qu'une ER implique. À la différence d'un kilogramme de charbon que l'on peut tenir « entre nos mains », il est impossible de tenir un kilo de vent! En effet, ces sources d'énergie renouvelable ne sont mobilisables qu'au moyen de technologies (condensateur, batterie) mais là encore, celles-ci n'ont pas un rendement très élevé : on constate d'importantes pertes énergétiques lors de la conversion ou encore un apport énergétique non négligeable pour fabriquer la machine de stockage.

5/ La limite physique au progrès technique. Enfin, on peut se dire que, dépendamment de la maturité actuelle des ER, l'EROI tendrait à augmenter en raison des récentes améliorations à leur efficacité. Il y a toutefois une limite au rendement lié au progrès technologique. Par exemple, le rendement énergétique théorique d'une éolienne peut atteindre au maximum 59% (c'est-à-dire qu'elle ne pourra au maximum capter que 59% de la puissance du vent). Cela montre que même si nous atteignons 100% d'efficacité, il existe des contraintes physiques qui empêchent les ER d'être aussi performantes que les EF.

Force est donc de constater que, dans un contexte de croissance économique, il est impossible aujourd'hui de remplacer les 560 EJ d'énergie mobilisés par 560 EJ d'ER car il n'y a pas une réelle relation de substituabilité entre ces deux sources d'énergie mais plutôt une relation de complémentarité. Dans l'état actuel de nos connaissances et de nos moyens, les ER ne semblent pas pouvoir remplacer les EF sans que cela ne réduise nos capacités de production, donc le PIB de nos économies nationales. On se retrouve donc acculés au pied du mur puisqu'on ne peut accomplir la transition énergétique en maintenant une croissance économique à long terme. Il faudrait décroître énergétiquement, du moins pendant quelque temps, si on veut un système énergétique viable. Mettre en place un tel système, c'est se serrer la ceinture le temps que la tempête passe. C'est donc renoncer à certains artifices, trouver des activités moins polluantes, l'économie de partage étant un exemple. Mais cela suppose une prise en charge politique. Que disent les politiques face à ce malheureux constat? Nous aident-ils à nous préparer à la décroissance énergétique?

C'est avec ces questions en tête que nous nous sommes intéressés au plan de transition allemand. L'Allemagne est le pays où le déploiement des ER est un des plus avancé. Elle occupe « la première place au niveau mondial concernant la puissance installée d'électricité éolienne par tête provenant des installations photovoltaïques » (BMW, 2017). C'est aussi le seul pays à viser une réduction des GES plus grande que le plafond accordé lors du protocole de Kyoto en 1990. Qu'en est-il vraiment?

D'abord, nous constatons que le plan de transition allemand s'accorde sur les mêmes objectifs de Kyoto et de Paris, avec 2020 comme date butoir, présentée comme l'année qui déterminera si nous avons atteint ou non les objectifs les plus importants :

1/ Baisse des GES. Réduire de 40% les GES en 30 ans. Pour atteindre cet objectif essentiel à stopper un quelconque risque d'emballement climatique, le ministère de l'Économie et de l'Énergie s'aligne avec les recommandations du GIEC et du PNUD :

2/ Baisse de l'énergie primaire. Diminuer de 20% la consommation primaire par rapport à 2008 et améliorer le rendement énergétique de 2,1% par an. Donc laisser la possibilité d'augmenter la consommation finale, due par exemple à la croissance démographique, donc faire en sorte que les individus ne subissent pas de « resserrement » de ceinture.

3/ Croissance des énergies renouvelables. Que la part des ER atteignent 18% dans la part de la consommation finale en 2020, pour tous les secteurs et tout type d'énergie (carburant renouvelable, électricité, chaleur).

Par ailleurs, conscient des dangers liés au nucléaire, l'Energiewende intègre :

4/ une sortie du nucléaire complétée en 2020.

Pour ce faire, le gouvernement prend les mesures suivantes :

1/ Adoption de lois pour a) encourager et rendre les systèmes plus efficaces par le plan d'action national sur l'efficacité énergétique (NAPE) et l'ordonnance sur les économies d'énergie (EneV) qui cherche à réduire la consommation énergétique des bâtiments; b) encourager le développement des ER grâce à la Loi EEG, loi fondamentale dans le plan de transition qui octroie des compensations financières à ceux qui investissent dans les ER.

2/ Etablissement d'un agenda « en 10 points » pour planifier la transition. Par ailleurs, une réunion semestrielle et un plan de suivi de la transition publié chaque année sont établis.

Afin de réussir à atteindre les objectifs, les stratégies de mises en œuvre sont :

3/ Le couplage des secteurs et leur électrification : chauffage électrique pour le bâtiment et l'industrie; moteur électrique pour les véhicules et renforcement du tramway et des trains.

4/ Un système énergétique plus flexible, remplaçant les centrales à charbon par des centrales à gaz afin de répondre plus rapidement aux intermittences des ER.

5/ La décentralisation du système de production énergétique.

6/ La numérisation du système énergétique pour faciliter la gestion des points 3/, 4/ et 5/.

7/ Des aides gouvernementales pour la recherche et développement dans le secteur de l'énergie, particulièrement dans le domaine de l'efficacité et des ER.

Quels sont les résultats?

1/ Les GES diminuent de 22,2% entre 1990 et 2016. Ils diminuent doucement de 3,5% entre 2010 et 2014 dans tous secteurs confondus mais augmentent, entre 2014 et 2016, de 1,3%.

2/ La consommation d'énergie primaire (TPES) baisse de 6,9% entre 2008 et 2016. Cependant, elle a augmenté de 1,7% entre 2014 et 2016. Le niveau de consommation en 2016 est presque le même que celui de 2012.

3/ Le rendement énergétique s'améliore de 1,3% par année.

4/ La part des ER dans la consommation finale atteint 14,9% en 2015. Avec le succès de la loi EEG, et dans l'optique de baisser les compensations financières, le ministère adopte en 2016 la loi sur le marché de l'électricité 2.0 qui signe l'ouverture à la concurrence des ER sur le marché de gros.

5/ La fermeture des centrales nucléaires se poursuit, passant de 22,4 GW de capacité installée en 2002 à 10,8 en 2015. Depuis 2015, il n'y a pas eu de fermeture de centrale supplémentaire.

Nous constatons que sur la période 2008-2016 la croissance est au rendez-vous, les GES diminuent, l'efficacité augmente, le déploiement des ER avance à bonne allure, la consommation d'énergie finale diminue, et le nucléaire ferme peu à peu ses portes. Le vrai succès de cette transition résiderait dans le déploiement des ER, qui, se rapproche très étroitement de l'objectif 2020 dans sa part croissante dans la consommation d'énergie finale (14,9% en 2015 sur 18% en 2020), la consommation d'électricité (31,6% sur 35%) et la consommation de chaleur (13,2% sur 14%) (Figure 71).

Le découplage absolu réussi au niveau du pays montre alors qu'on pourrait réussir au moins une amorce de transition énergétique sans décroissance.

Cependant, ce découplage ne survient pas au rythme initialement souhaité par le gouvernement allemand. Compte tenu des résultats qui se placent en deçà des objectifs, le cas de l'Allemagne lève le voile sur l'existence de certaines limites que nous avons exposées dans ce mémoire, soit la tentative de lier une économie soutenable sur le plan écologique et une économie de croissance productiviste.

Au premier abord, on pourrait dire qu'il serait difficile pour l'Allemagne de sortir des énergies fossiles car, malgré l'urgence d'agir, le charbon reste un socle central dans l'approvisionnement énergétique allemand, particulièrement dans l'approvisionnement en électricité. En outre, le charbon, serait un pilier pour le remplacement du nucléaire et une ressource clef dans sa balance commerciale par le biais d'exportations en électricité, ces dernières étant un facteur central dans la croissance du PIB allemand.

Par ailleurs, l'étude met de l'avant les limites physiques de la possible substituabilité du charbon par les énergies renouvelables en augmentant l'utilisation du gaz. Des projets d'acheminement de gaz prennent forme. En effet, l'Allemagne doit importer 93% du gaz qu'elle utilise, soit près de 80 milliards de mètres cubes chaque année, depuis la Russie, la Norvège et les Pays-Bas afin de maintenir sa croissance économique. Le gaz, souvent présenté comme « deux fois moins polluant que le charbon », n'est pourtant pas la panacée en termes de substitution des combustibles fossiles. Bien que le gaz naturel utilisé en Europe est actuellement du gaz naturel conventionnel qui n'engendre pas de fuite lors de son extraction, il est important de rappeler que la pollution relative à ce combustible fossile ne réside pas uniquement dans sa combustion, mais avant tout dans les « pertes, fuites et combustions incomplètes » qui émettent du CH₄, dont l'impact sur le réchauffement climatique est 86 fois plus grand⁴⁴³ que le CO₂ (Matthews & Chavaillaz, 2017 : 60-62)⁴⁴⁴. Tant et si bien qu'en

⁴⁴³ Sur une période de 20 ans (Matthews & Chavaillaz, 2017 : 62).

France, un moratoire a été adopté sur l'interdiction de la fracturation hydraulique, méthode d'extraction du gaz de schiste très polluante. Ainsi, nous ne sommes pas à l'abri définitif de l'utilisation de ces réserves françaises, que l'Allemagne pourrait facilement importer.

Ainsi, l'Allemagne ne peut aucunement se passer d'énergie fossile, du moins pour le moment, et étant donné la faible décroissance de la consommation énergétique et une tendance à la hausse depuis 2014, rien n'augure une possible sortie des énergies fossiles.

Par ailleurs, le plan de transition ne prend pas en considération l'apport énergétique demandé pour développer les ER, ni leur EROI plus faible que celui des EF. Effectivement, rappelons que la production de technologies vertes demande un apport énergétique important, ce qui n'est pas mentionné dans le plan de transition, et que celles-ci ont des rendements énergétiques bien plus faibles que ceux des EF, ce qui, avec un rythme de développement tel qu'on connaît actuellement, risque de cannibaliser l'énergie nécessaire à la croissance économique. Face à des résultats de diminution GES satisfaisants sur le territoire allemand, quel est le véritable bilan de cette transition énergétique amorcée par l'Energiewende à l'échelle mondiale ? Ainsi, sans mesurer un bilan énergétique global, nous questionnons la pertinence de ce découplage absolu observé à l'échelle du pays, et nous nous demandons si ce découplage est réellement absolu à l'échelle mondiale.

Sur le plan technique, avec le faible rendement des ER, leur nécessaire et important support en fossile et matériaux, leur durée de vie de 20 ans et l'intermittence qu'elles causent les 4/5^{ème} du temps, ou encore la difficulté à les stocker, il est difficile aujourd'hui d'oser penser qu'on pourra, tel que le recommandent le GIEC et le PNUD, sortir un jour des énergies fossiles sans décroissance énergétique.

⁴⁴⁴ Matthews, D., & Chavaillez, Y. (2017). In *Gaz naturel - une énergie de transition* (p. 60-62, 98 pages). Montreal: Collectif scientifique sur la question du gaz de schiste. Consulté à l'adresse <http://www.collectif-scientifique-gaz-de-schiste.com/accueil/index.php/conferences/conferences-du-collectif/2017>

Enfin, il est facile de penser que la transition énergétique se définit comme le passage de l'énergie nucléaire et du charbon aux énergies renouvelables. En réalité, pourtant, compte tenu des limites physiques et économiques que nous avons analysées dans ce mémoire, « une économie basée sur l'énergie renouvelable n'est envisageable qu'avec une forte baisse de la consommation énergétique. Il ne peut y avoir d'avenir renouvelable sans réduction significative de la consommation énergétique » (Morris, Penht, 2012 : 35). Sortir des énergies fossiles et du nucléaire exige donc une réduction de la production et de la consommation énergétique finale, ce qui n'est pas véritablement envisagé par le plan allemand. Au contraire, ne désirant pas entamer des procédures de restriction de la consommation finale, tout porte à croire qu'elle préfère miser sur la diminution de la consommation d'énergie primaire, et répondre aux mêmes besoins, grâce à l'efficacité énergétique. Or, sans mesure restrictive à l'aval du flux énergétique, on note la création d'effets rebonds dans les transports et les exportations. Les voitures sont plus efficaces, mais malheureusement, on constate aussi une augmentation dans la consommation en énergie primaire.

Il nous apparaît donc que la proposition d'une transition énergétique, telle que proposée par les organisations consacrées aux enjeux énergétiques, c'est-à-dire sortir des énergies fossiles en maintenant une croissance économique, a des limites physiques et économiques que ces organisations ne semblent pas tout à fait tenir compte.

Tandis que les gouvernements et entreprises centrent leur discours sur la croissance économique dont le Graal serait le progrès technologique établi par le monde scientifique, on peut se demander alors si ces organisations ne font pas face à un déni.

Apports du mémoire

La principale difficulté de ce mémoire est son sujet lui-même. Ce sujet pourtant si essentiel (il s'agit de notre survie) s'avère très complexe car il lie à la fois les lois physiques et les théories économiques. Pire encore, il les confronte! Il demande donc une transdisciplinarité qui fait de nous des incompetents éternels (pour bien traiter ce sujet, il faut s'y connaître en physique et en économie, ce qui est plutôt rare!). Un des apports de ce mémoire a donc été son travail de vulgarisation concernant un domaine très technique et néanmoins crucial pour la suite de l'histoire de l'humanité. Il s'agit avant tout de permettre de comprendre les enjeux énergétiques actuels.

La deuxième grande difficulté fut la récolte des statistiques énergétiques. Beaucoup de sources et donc de temps passé pour aller chercher des statistiques, qui par ailleurs, étaient parfois discordantes (à plus ou moins 10% près). L'AIE ne tient pas exactement les mêmes données énergétiques que le ministère des Affaires économiques et de l'énergie allemand lui-même. Par exemple, la part des ER dans le secteur de l'électricité en 2015 est de 12,5% pour le ministère et de 14% pour l'AIE. Ainsi, ce travail de recherche a permis de mettre en exergue la difficile tâche de recueil des données énergétiques des grandes organisations. C'est un travail colossal. C'est pourquoi les données de « l'Energy World Outlook » de l'AIE sont souvent celles recueillies deux ans avant la date de parution.

Ce mémoire, de plus, vient questionner une évidence assénée sans relâche par nos « décideurs » : la transition énergétique peut être accomplie sans rien sacrifier à notre mode de vie et à notre niveau de vie matériel. C'est cette évidence que mon travail vient interroger, dans le souci d'éviter certaines désillusions catastrophiques. Il s'agit en d'autres termes de nourrir un débat sur ces questions, en y introduisant la possibilité d'une « décroissance soutenable ».

Enfin, l'apport essentiel de ce travail de recherche est de mettre en avant ce mur vers lequel on se dirige (ces limites physiques à la transition énergétique) et qu'il est pour moi essentiel d'appréhender pour préparer les esprits à la décroissance qui vient.

Limites de l'étude

Je n'ai pas à proprement parler expliqué l'intégralité des limites que connaît le plan allemand. Ce ne sont pour l'essentiel que des conjectures proposées dans ce mémoire. Pour cela, il aurait été intéressant de mener une enquête plus serrée, de façon à obtenir les données nécessaires à la démonstration. Par exemple, j'aurais souhaité fournir un résultat quantitatif concret du cannibalisme énergétique allemand, ou bien de l'énergie qu'il a fallu déployer pour construire tout le parc éolien allemand par exemple. Par ailleurs, pour bien faire, il aurait fallu examiner d'autres plans de transition afin d'avoir une idée sur les convergences et divergences de stratégie.

De plus, la question de l'efficacité énergétique n'a été traitée que partiellement. Il aurait fallu présenter, secteur par secteur, le potentiel et les limites physiques théoriques inhérentes à cette recherche du rendement.

Il faut sans doute aussi rester prudent concernant nos conclusions. Au minimum, rien n'interdit de penser qu'il pourrait y avoir une révolution technologique qui viendrait modifier totalement les données du problème. La fusion nucléaire pourrait rendre nos systèmes énergétiques abondants et non polluants. Il reste que la première loi de la thermodynamique ne peut être transgressée : on ne crée pas d'énergie, jamais. On ne fait que la transformer... en déchets (2^{ème} loi) ! Aujourd'hui, 50 milliards de dollars ont déjà été investis dans le projet de fusion nucléaire, qui dure depuis 20 ans...

Prolongements éventuels, questions restant à traiter

Un prolongement de ce travail pourrait consister à étudier d'autres plans de transition. Nous pensons en particulier ici au scénario négaWatt et au plan de l'AIE. Pour le scénario négaWatt, la transition énergétique a pour objectif d'atteindre le triptyque « sobriété, efficacité et énergies renouvelables » à l'horizon 2050. C'est une démarche en trois temps : la transition énergétique devrait d'abord répondre à nos besoins de services énergétiques par la sobriété énergétique, c'est-à-dire une diminution, voire une suppression, des besoins superflus, par l'efficacité ensuite, c'est-à-dire la mise en action de techniques le long de la chaîne de valeur énergétique pour diminuer les pertes, et enfin par le développement des énergies renouvelables.

Par ailleurs, ce plan initie aussi une philosophie de vie à changer : penser long terme, ne plus mettre le bénéfice économique au centre de toutes nos préoccupations, décider de nos actions et non pas attendre que le progrès technologique vienne nous sauver, car tout progrès pourrait ne pas être une amélioration. « Intégrer les impératifs du long terme dans nos décisions de court terme » (négaWatt, 2014 : 8)⁴⁴⁵. Cette nouvelle façon de penser pourrait ouvrir la voie à un nouveau paradigme. Car comme le souligne Theurillat-Cloutier, « au-delà de la question technique de l'inadéquation entre les moyens et les fins, il reste tout à fait légitime de se demander si ce virage énergétique vise juste, relativement à l'ampleur de la crise écologique qu'affronte l'humanité. » (Theurillat-Cloutier, 2014).

Concernant l'IAE, il aurait été très intéressant de comprendre d'un point de vue plus global les grands enjeux inhérents à la transition énergétique, particulièrement ceux engendrés par les pays « en voie de développement » qui, basés sur le modèle occidental de croissance

⁴⁴⁵ Association négaWatt. (2014). *Scénario négaWatt 2011-2050* (p. 8). Consulté à l'adresse https://negawatt.org/IMG/pdf/150505_scenario-negawatt_hypotheses-et-methode.pdf

économique, risquent de provoquer plus de pollution. D'un autre côté, il aurait été intéressant de mieux connaître les dynamiques de soutien financier et le transfert de la connaissance technologique des pays du Nord vers ceux du Sud. Cela nous aurait amenés à nous questionner sur le rôle de domination de ces premiers pays pollueurs.

En revanche, un travail qui reste à faire serait de concevoir un plan de décroissance soutenable (intégrant la transition énergétique) pour une collectivité comme le Québec. Un tel plan serait d'autant plus faisable que le Québec jouit du privilège de disposer d'hydroélectricité.

« Dans un monde en contraction, la productivité devient difficile à justifier. Il sera totalement absurde d'engager des ressources de plus en plus rares pour construire, entretenir et alimenter des machines qui exécutent des travaux que la main d'œuvre humaine peut aussi bien faire, même si les machines sont forcément plus productives. [...] Ainsi, dans un monde en contraction, le travail humain jouit d'un avantage qui compense largement la capacité de la machine à travailler presque sans interruption : il est bien moins gourmand en énergie et en technologie » (Greer, 2013 : 162-163).

Selon moi, un plan de transition écologique cohérent devrait

1/ Repenser notre rapport à la machine. Le concept des « low-tech » proposé par Philippe Bihoux dans les années 2000, a pour objectif l'émancipation de l'homme vis-à-vis de la machine. De manière concrète, introduire le low-tech, défini comme des machines ou systèmes qui n'utilisent pas de technologie moderne ou sophistiquée seraient plus accessibles (Fernandez, 2003)⁴⁴⁶ à l'homme (fabrication et réparation possibles) et donc plus facilement maîtrisables.

⁴⁴⁶ Fernandez, S. (2003). *Low-tech : la deuxième voie technologique*. *Econovateur.com*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse http://www.econovateur.com/rubriques/anticiper/voiritech5_1103.shtml

Introduire cette nouvelle façon de faire, mais aussi de penser, nous permettrait de s'émanciper d'un progrès technique toujours plus contrôlant, toujours plus aliénant, et de retrouver l'usage de notre propre machine.

Sur le plan énergétique, et tel que nous l'avons souligné dans ce mémoire grâce à la thèse de Jancovici, notre machine (nos bras, nos jambes) sont plus efficaces que les autres machines. Par exemple, cette étude présentée dans la figure ci-dessous montre que le transport le plus efficace réside dans le transport low-tech, c'est-à-dire le vélo et la marche :

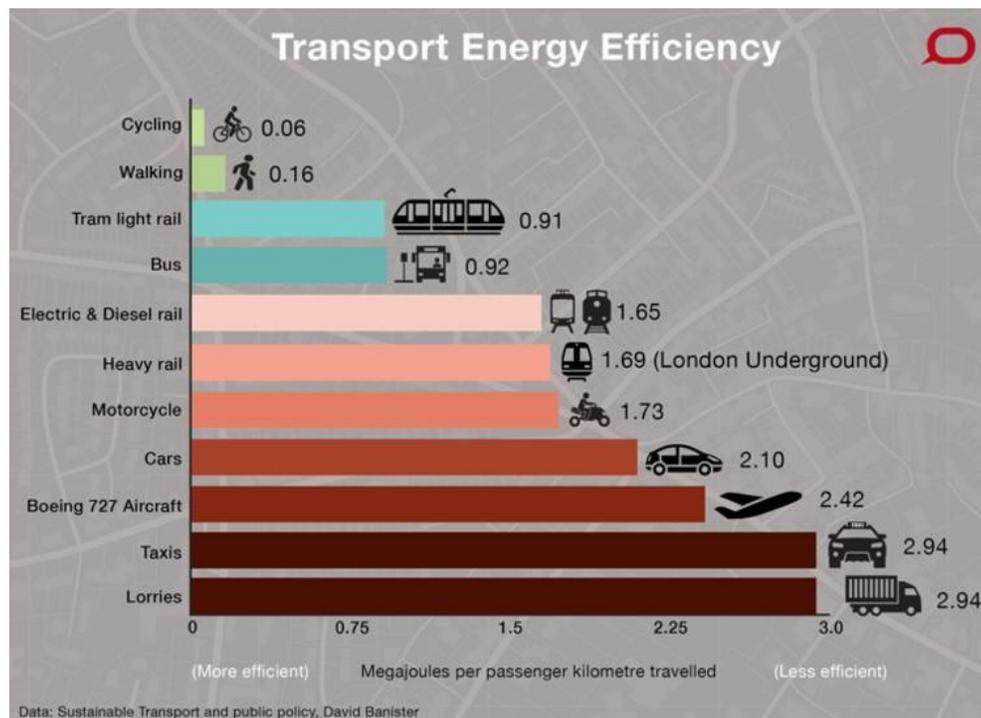


Figure 86. Classement des moyens de transports les plus efficaces (Source : Gordon, 2014)⁴⁴⁷

Contrairement à ce qu'on peut en penser, ces modes de transport représentent le meilleur rendement énergie demandée / km parcouru.

⁴⁴⁷ Gordon, C. (2014). *Which transport is the fairest of them all?*. The Conversation. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://theconversation.com/which-transport-is-the-fairest-of-them-all-24806>

En effet, **l'avantage que présente le travail humain par rapport à la machine, est que celui-ci peut exercer une quantité « pratiquement illimitée » d'activités économiques productives** (Greer, 164). On pourrait penser en effet qu'il est facile de recycler une machine dans une autre usine. Mais Greer dit que « pour des raisons d'efficacité, la plupart des robots industriels sont conçus pour effectuer une gamme très réduites d'opérations » Ainsi, « l'apparence de productivité supérieure d'un robot dépend d'un accès à un réseau d'usines et de services bien plus étendu que celui dont a besoin un humain, et son réseau de soutien dépend à son tour de la disponibilité d'énergie abondante et bon marché ainsi que d'un large éventail de ressources et de fournitures spécialisées dont un humain n'a pas besoin » (Greer, 2013 : 164). « Ce qui rend les robots plus économiques en période d'abondance est le faible coût de l'énergie de carburant fossile » (Greer, 2013 : 164).

Ainsi les études sur les low-techs, seraient une bonne ouverture et une façon de reprendre le contrôle sur nos moyens de production.

Toutefois, on se doute bien que tout ne peut se faire à vélo, en courant ou à pied. Comment importer nos bananes costaricaines? D'où le besoin de relocaliser le plus possible notre économie.

2/ S'engager dans la relocalisation de notre économie

Il s'agirait de produire sur place, le plus possible, plutôt que de produire des unités délocalisées dans des pays à faible coûts salariaux. Produire sur place permettrait d'amoinrir le fossé qui existe entre le coût monétaire proposé et le vrai coût énergétique. Comme aujourd'hui nous vivons dans un système économique qui nie les épuisements énergétiques, nous produisons comme si nous vivions dans des conditions d'abondance. Ainsi le prix

économique d'un jean ne reflète pas toujours (voire jamais) son vrai coût énergétique (Ottombre-Borsoni, s.d.)⁴⁴⁸

3/ Intégrer une vision plus holistique du problème et questionner, au moyen des disciplines philosophique, sociologique et anthropologique, pourquoi on en est arrivé là.

« Comment penser pouvoir s'engager, collectivement, sur un autre chemin que celui qui nous mène déjà vers la destruction du monde et des cultures, sans revenir à ce niveau de réflexion, sans réfléchir de nouveau sérieusement sur la nature essentielle de ce qu'il s'agit de préserver et de sauver? » (Michel Freitag cité par Biagini, C., Murray, D., & Thiesset, P. 2017 : 115)⁴⁴⁹.

Nous ne pouvons en effet que constater, en ce début du 21^e siècle, combien nous provoquons la nature. D'un point de vue anthropologique, on pourrait dire que l'essence même de la technique moderne, c'est l'arraisonement ou encore le fait de soumettre la nature à la domination de la raison. Et la nature n'en devient ni plus ni moins qu'un fond d'exploitation. Or d'un point de vue écologique, l'humanité est indissociable de la machine thermique « Terre ». Elle ne peut donc qu'évoluer de concert avec elle...

L'être humain fait partie d'un tout que nous appelons « l'Univers »; il demeure limité dans l'espace et le temps. Il fait l'expérience de son être, de ses pensées et de ses sensations comme étant séparés du reste, une sorte d'illusion d'optique de sa conscience. Cette illusion est pour nous une prison, nous restreignant à nos désirs personnels et à une affection réservée à nos proches. Notre tâche est de nous libérer de cette prison en élargissant le cercle de notre compassion afin qu'il embrasse tous les êtres vivants, et la nature entière, dans sa splendeur...

⁴⁴⁸ Ottombre-Borsoni, M. *Beaucoup d'énergie sans le savoir* | *Quelle énergie durable pour demain ?*. *Energiepourdemain.fr*. Consulté 9 août 2017, à l'adresse <http://energiepourdemain.fr/beaucoup-d-energie-sans-le-savoir/#01>

⁴⁴⁹ Biagini, C., Murray, D., & Thiesset, P. (2017). *Aux origines de la décroissance*. Montréal: Ecosociété.

De ce fait, il semblerait important de se réconcilier avec elle.

i) D'un point de vue éthique. Lors de grands sommets internationaux, les grands penseurs mandatés frappent d'immenses et insurmontables difficultés en matières de concepts et définitions entre l'homme et la nature et leur relation l'un à l'autre. Ces difficultés reposent sur des différences culturelles, civilisationnelles, historiques, etc.

ii) D'un point de vue politique. Si nous nous accordons à considérer que les sciences de la vie et de la Terre n'ont par essence aucune limite spatio-temporelle, alors il est abscons de demander à des politiciens de s'atteler à pareils problèmes, lorsqu'eux-mêmes limités dans le temps défendent des intérêts limités dans l'espace.

iii) D'un point de vue juridique. Si nous avons créé les droits de l'homme universels, reposant sur la notion « d'ayant droit », si un tribunal pénal international vise à punir tout crime contre l'humanité, alors pourquoi ne pas garantir à la planète et ses ressources un statut d'« ayant droit »? Nous sommes trop souvent en guerre entre voisins et oublions la violence inouïe de la guerre meurtrière engagée avec la planète, notre seul habitat.

iv) D'un point de vue des religions. Si dans l'Antiquité, différentes civilisations affirmaient combien l'homme n'était qu'un maillon d'une chaîne en laquelle s'imbriquaient les différents concepts métaphysiques, force est aujourd'hui de constater que les interprétations modernes des textes anciens se sont concentrées sur des codes éthiques et moraux reléguant la nature et ses ressources au stade primal de la création.

v) Rajouter dès lors à cela un vaste sentiment d'impuissance face à l'incurie des deux premières puissances mondiales que sont la Chine et les USA, en plus d'être flanquées du triste statut de plus grands émetteurs de GES de la planète, il nous appert plus qu'autrement que nous sommes dans une impasse.

4/ Questionner pour mieux proposer. Nous pensons que la croissance économique doit être remise en cause. Les thèses des auteurs présentés dans ce mémoire, particulièrement celles associées au courant de pensée de l'écologie économique, nous convainc du caractère non soutenable sur le plan écologique de la croissance économique. Intimement, nous pensons également qu'elle ne l'est pas non plus sur le plan social. Si le système économique dominant dogmatise l'idée qu'elle est un impératif pour maintenir de bonnes conditions de vie sur terre, nous pensons que d'autres modèles économiques, cette fois-ci soutenables, sont possibles. Nous pensons également qu'une économie stationnaire ou bien une décroissance (non subie mais réfléchie) est possible sans menacer nos conditions d'existence. Si l'on s'en tient aux thèses de Daly et de Roegen, ces économies sont même espérées si nous voulons éviter le mur devant nous. Par ailleurs, ces modèles pourraient être une forme d'émancipation pour l'homme. Se questionner sur la réelle nécessité d'une croissance économique permet une certaine « décolonisation de notre imaginaire » pour s'ouvrir, réfléchir et proposer d'autres façons de gérer notre maison, notre collectivité et nos sociétés, anciennes ou nouvelles, mais surtout plus sages.

C'est en regardant la jeunesse, héritière de notre chère planète, que l'on est rappelé à l'essentiel. Et c'est en l'écoutant, aussi :

*« Aimer la Terre, c'est s'aimer soi-même.
Polluer la Terre, c'est polluer nos âmes » Mathieu, 13 ans, 6^e année.*

Bibliographie

- 5^{ème} GAUCHE. (2015). *Comment fabriquer l'hydrogène*. Planète Énergies. Consulté le 7 août 2017, depuis <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/comment-fabriquer-l-hydrogene>
- 5^{ème} GAUCHE. (2015). *L'utilisation du charbon : électricité, sidérurgie, carbochimie*. Planète Énergies. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-utilisation-du-charbon-electricite-siderurgie-carbochimie>
- 5^{ème} GAUCHE. (2015). *Production mondiale de pétrole*. Planète Énergies. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.planete-energies.com/fr/medias/chiffres/production-mondiale-de-petrole>
- Changements Climatiques.org. (2012). *390 ppm: la concentration de CO2 dans l'atmosphère franchit un nouveau cap*. ChangementsClimatiques.org. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://changementsclimatiques.org/2012/01/09/390-ppm-la-concentration-de-co2-dans-latmosphere-franchit-un-nouveau-cap/>
- 750 éoliennes = 1 réacteur nucléaire | Ethicologique. (2017). Ethicologique.org. Consulté le 7 août 2017, depuis <http://ethicologique.org/index.php/750-eoliennes-1-reacteur-nucleaire/>
- À propos de l'énergie renouvelable. (2016). Rncan.gc.ca. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296#bio>
- Abraham, Y., & David, M. (2015). *"Faire l'économie de la nature", Creuser jusqu'où? Extractivisme et limites à la croissance* (1st ed., p. 205, 384 pages). Montréal: Ecosociété.
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME], *Bilan Carbone Entreprises et Collectivités*. (2010) (p. 59, 69 pages). Consulté le 3 août 2017, depuis http://23dd.fr/images/stories/Documents/PV/Ademe_Metro_Chapitre_2_Energie.pdf
- ADEME. (2015). *Energy Efficiency Country Profile: Germany*. Enerdata. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.odyssee-mure.eu/publications/profiles/>

- Agence Internationale de l'Energie [AIE]. (2005). *Manuel sur les statistiques de l'énergie* (pp. 19, 210 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_french.pdf
- AIE. (2013). *2013 Review Germany* (p. 172, 206 pages). Paris: AIE/OCDE. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Germany2013_free.pdf
- Agence Internationale de l'Energie. (2013). *World Energy Outlook 2013* (pp. 470, 687 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2013.html>
- Agence Internationale de l'Energie. (2015). *CO₂ Emissions From Fuel Combustion* (p. xiii-xiv, 548 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>
- Agence Internationale de l'Energie. (2015). *World Energy Outlook 2015* (pp. xiii;274, 700 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.iea.org/newsroom/news/2015/november/world-energy-outlook-2015.html>
- Agence Internationale de l'Energie. (2016). *CO₂ Emissions From Fuel Combustion* (p. Version Excel, onglet "CO₂ FC"). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2016.html>
- Agence Internationale de l'Energie [AIE]. (2016). *Energy efficiency indicators* (pp. 10; 62; 144 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017 depuis https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyIndicatorsHighlights_2016.pdf
- Agence Internationale de l'Energie. (2016). *Key World Energy Statistics 2016* (pp. 6;28, 80 pages). Paris: OCDE/AIE. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>
- AIE. (2016). *Decoupling of global emissions and economic growth confirmed*. Iea.org. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/march/decoupling-of-global-emissions-and-economic-growth-confirmed.html>

- AIE. (2017). *Germany - Energy System Overview 2015*. AIE/OCDE. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.iea.org/media/countries/Germany.pdf>
- AIE. (2017). *Germany: Electricity and Heat for 2014*. Iea.org. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2014&country=GERMANY&product=ElectricityandHeat>
- AIE (2017). *IEA - Report*. (2017). Iea.org. Consulté le 10 août 2017, depuis <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2014&country=GERMANY&product=RenewablesandWaste>
- AIE (2017). *Oil*. Iea.org. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.iea.org/about/faqs/oil/>
- Albertini, J., & Silem, A. (2010). *Lexique d'économie* (11th ed., pp. 245; 247; 347; 412; 791). Dalloz - Lexiques.
- Appunn, K., Bieler, F., & Wettengel, J. (2017). *Germany's energy consumption and power mix in charts*. *Clean Energy Wire*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
- Appunn, K. (2017). *Germany's greenhouse gas emissions and climate targets*. *Clean Energy Wire*. Consulté le 27 septembre 2017, depuis <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-greenhouse-gas-emissions-and-climate-targets>
- Association Hespul. (2014). *Photovoltaïque.info | Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité | L'Allemagne*. *Photovoltaïque.info*. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.photovoltaïque.info/L-Allemagne.html>
- Association négaWatt. (2014). *Scénario négaWatt 2011-2050* (p. 8). Consulté le 9 août 2017, depuis https://negawatt.org/IMG/pdf/150505_scenario-negawatt_hypotheses-et-methode.pdf
- Audet, R. (2015). *Pour une sociologie de la transition écologique* (pp. 31;58, 175 pages). Montréal: Athéna éditions.
- Auzanneau, M. (2011). *Shell : il faut quatre Arabie saoudite en plus d'ici dix ans!* *Oil Man*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://petrole.blog.lemonde.fr/2011/09/24/shell-il-faut-arabies-saoudites-en-plus-dici-a-2020/>

- Auzanneau, M. (2014). *Gaël Giraud, du CNRS : « Le vrai rôle de l'énergie va obliger les économistes à changer de dogme »*. *Oil Man*. Consulté le 4 août 2017, depuis <http://petrole.blog.lemonde.fr/2014/04/19/gael-giraud-du-cnrs-le-vrai-role-de-lenergie-va-obliger-les-economistes-a-changer-de-dogme/>
- Auzanneau, M. (2015). *Limites de la croissance : cette fois, le loup est là*. *Oil Man*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://petrole.blog.lemonde.fr/2015/09/02/limites-de-la-croissance-cette-fois-le-loup-est-la/2/>
- Barnhart, C., Dale, M., Brandt, A., & Benson, S. (2013). The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity. *Energy & Environmental Science*, 6(10), 2804. doi:10.1039/c3ee41973h
- Bauer, A. (2007). *Eolien, solaire : de multiples goulets d'étranglement*. *lesechos.fr*. Consulté le 10 août 2017, depuis https://www.lesechos.fr/24/10/2007/LesEchos/20032-155-ECH_eolien--solaire---de-multiples-goulets-d-etranglement.htm#lx7s3KlvFYg2jsuK.99
- Bezat, J. (2017). *EDF s'ouvre une porte sur l'éolien en Allemagne*. *Le Monde.fr*. Consulté le 10 août 2017, depuis http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/04/26/edf-s-ouvre-une-porte-sur-l-eolien-en-allemande_5118013_3234.html#wgpCqoFP05Ia0uOO.99
- Bezat, J., & Mandraud, I. (2017). *Le nouveau gazoduc Nord Stream 2 divise l'Europe*. *Le Monde.fr*. Consulté le 9 août 2017, depuis http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/04/25/le-nouveau-gazoduc-nord-stream-2-divise-l-europe_5117043_3234.html#YSg2yBarpp7Fwm18.99
- Biagini, C., Murray, D., & Thiesset, P. (2017). *Aux origines de la décroissance*. Montréal: Ecosociété.
- Bibeau, M. (2016). *Rapport au parlement sur l'aide au développement officiel du gouvernement du Canada 2015-2016* (pp. 2, 49 pages). Ottawa: Marie-Claude Bibeau. Consulté le 3 août 2017, depuis http://international.gc.ca/gac-amc/assets/pdfs/publications/daaa-lrmado_1516_rapport.pdf
- Bilan radiatif de la Terre - Rayonnement infrarouge émis*. *Eduscol.education.fr*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/climat/pistpeda/bilanrad/bilan5.htm>

- Blake Alcott, « *Effet rebond* », in Giacomo d'Alisa, Federico Demaria, Giorgos Kallis, *Décroissance : vocabulaire pour une nouvelle ère*, Montréal, Écosociété, 2015, pp. 155-159.
- BMWI. (2014). *Premier rapport de suivi « Transition énergétique » Version courte* (p. 8). Berlin: BMWI. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fortschrittsbericht-kurzfassung-fr.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- BMWI. (2016). *Cinquième rapport de suivi « Transition énergétique »* (pp. 5;14;17, 31 pages). Berlin: Le Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie [BMWI]. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- BMWI. (2016). *Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2015* (p. 7). Berlin: BMWI.
- BMWI. (2016). *Green Paper on Energy Efficiency* (p. 7). Berlin: BMWI. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/green-paper-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- BMWI. (2017). *Coup d'envoi de l'initiative de soutien « transition énergétique dans les transports »*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170227-startschuss-fuer-foerderinitiative-energiewende-im-verkehr.html>
- BMWI. (2015). *Development of primary energy consumption by energy sources*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <https://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Infografiken/fortschrittsbericht-energieeffizienz.html>
- BMWI. (2016). *Renewable Energy Sources in Figures* (pp.6-7, 76 pages). Berlin: BMWI. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=13
- BMWI. (2017). *Germany makes it efficient*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, from <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-efficiency.html>
- BMWI. (2017). *Investir dans l'avenir de l'Allemagne et de l'Europe - Systématiser la transition*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis

http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Textsammlungen/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik.html?cms_artId=257492

BMWI. (2017). *La campagne d'information « Deutschland macht's effizient »*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/efficacite-energetique.html>

BMWI. (2017). *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

BMWI. (2017). *Le Plan d'action national pour l'efficacité énergétique : de l'énergie et plus encore*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/la-plate-forme-performance-energetique-et-le-plan-d-action-national.html>

BMWI. (2017). *Le secrétaire d'État Uwe Beckmeyer se félicite de l'adoption de la loi relative à l'autoconsommation collective d'électricité*. Consulté le 8 août 2017 depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170630-beckmeyer-mieterstromgesetz-im-bundestag-verabschiedet.html>

BMWI. (2017). *Progression de la transition énergétique dans le secteur des bâtiments*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/batiment.html>

BMWI. *For a future of green energy*. BMWI.de. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html>

BMWI. *Industrie 4.0 ou la numérisation de l'économie*. BMWI.de. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Industrie/industrie-4-0-ou-la-numerisation-de-l-economie.html>

BMWI. *Key factors for a secure energy supply*. BMWI.de. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Dossier/conventional-energy-sources.html>

BMWI. *La nouvelle phase de la transition énergétique peut commencer*. BMWI.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/transition-energetique.html>

BMWI. *Les pierres angulaires de la sécurité énergétique*. BMWI.de. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Dossier/energies-conventionnelles.html>

- BMW. *Marché de l'électricité de demain*. BMW.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Dossier/marche-de-lectricite-de-demain.html>
- BMW. *Poser les jalons d'un approvisionnement en électricité viable: Processus de discussion « Électricité 2030 »*. BMW.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/strommarkt-der-zukunft-strom-2030.html>
- BMW. *Que signifie « marché de l'électricité 2.0 »?*. BMW.de. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMW.de/Redaktion/FR/FAQ/marche-de-l-ectricite-2-0/01-faq-marche-de-l-ectricite-2-0.html>
- BMW. *Renforcer la base de la croissance en Europe*. BMW.de. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.BMW.de/Redaktion/FR/Artikel/Economie/schwerpunkte-der-wirtschaftspolitik-04.html>
- Bornemann, B. (2015). *Allemagne : Un point sur les projets éolien en mer*. Energiesdelamer.eu. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.energiesdelamer.eu/publications/112-8allemagne-un-point-sur-les-projets-eolien-en-mer>
- Boulangier, V. (2015). *Transition énergétique* (pp. 12;23;29;89;92171 pages). Les petits matins.
- BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy June 2017* (p. "Primary Energy Consumption"). Excel [Logiciel]. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>
- Caroli, T. (s.d.). *Atténuations des changements | Le 5ème rapport du GIEC décrypté*. Leclimatchange.fr. Consulté le 10 août 2017, depuis <http://leclimatchange.fr/attenuations-des-changements/>
- CCFA. (2016). *Le point sur le programme Industrie 4.0 en Allemagne - CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles*. Ccfa.fr. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://www.ccfa.fr/Le-point-sur-le-programme>
- Chappoz, L. (2013). *Les politiques d'efficacité énergétique en France et en Allemagne : quand deux voisins empruntent des chemins différents* (p. 10). Paris: Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI). Consulté à l'adresse

http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/STUDY0413_LC_France%20Allemagne.pdf

Clément, N. *CNRS - Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie. Cnrs.fr.* Consulté le 7 août 2017, depuis <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2013/bulles.htm>

CO₂.Earth. (2017). *Earth's CO₂ Home Page.* CO₂.Earth. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://www.co2.earth/>

Commission européenne. (2017). *L'objectif d'augmenter l'efficacité énergétique de 20 % d'ici à 2020 en passe d'être atteint, et même dépassé* (p. 3). Bruxelles. Consulté le 3 août 2017, depuis http://file:///C:/Users/ochamakh/Downloads/MEMO-17-162_FR.pdf

Connaissance des Énergies. (2015). *Pourquoi « torche »-t-on du gaz ?.* (2015). *Connaissance des Énergies.* Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.connaissancedesenergies.org/pourquoi-torche-t-du-gaz-150408>

Cornot-Gandolphe, S. (2016). *Centrale à charbon.* *Connaissance des Énergies.* Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>

Court, V. (2016). *Énergie, Eroi Et Croissance Économique Dans Une Perspective De Long Terme* (Doctorat Es Sciences Économiques). Université Paris Nanterre, Ifp Énergies Nouvelles, Chaire Économie Du Climat.

Court, V. (2017). *Taux de Retour Énergétique (TRE)* (pp. 7;13, 26 pages). Séminaire HEC Energie. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://victor-court.com/>

Cousineau, J. (2013). *Les Instituts Fraunhofer, En Allemagne, Travaillent Fort Sur Le Moteur-Roue.* *Eco-énergie à Montréal.* Consulté le 10 août 2017, depuis <http://eco-energie-montreal.com/post/instituts-fraunhofer-moteur-roue-pierre-langlois%E2%80%8F/>

Criqui, P. (2016). *Une Allemagne sans charbon en 2040 ? C'est mal parti... | Contrepoints.* *Contrepoints.* Consulté le 8 août 2017, depuis <https://www.contrepoints.org/2016/10/08/268193-allemande-charbon-2040-cest-mal-parti>

- Cukier, K. (2012). *More 2,000 years in a single graphic*. *Economist.com*. Consulté le 4 août 2017, depuis <http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2012/06/mis-charting-economic-history>
- Daly, H. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3), 261-266. doi:10.1016/s0921-8009(97)00080-3
- De Monicault, F. (2016). Le monde peut-il se passer de charbon?. *Le Figaro*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.pressreader.com/france/le-figaro/20160301/281517930202725>
- Deharo, A. (2017). *Allemagne : une croissance économique dopée par l'arrivée des réfugiés*. *Rtl.fr*. Consulté le 26 septembre 2017, à l'adresse <http://www.rtl.fr/actu/international/allemande-une-croissance-economique-dopee-par-l-arrivee-des-refugies-7786775503>
- Deléage, J. (2014). Les servitudes de la puissance : conflits de classe autour de l'énergie. *Ecologie & Politique*, 49(2), 15, pages 11 à 21. doi:10.3917/ecopo.049.0011
- Depiereux, E. *Régression et coefficient de détermination*. FUNDP. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://webapps.fundp.ac.be/biostats/biostat/modules/module20/page5.html>
- Déry, P. (2008). *Quel rendement sur notre investissement énergétique ?* (pp. 3-8, 20 pages). Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD), Saguenay—Lac-Saint-Jea, Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB). Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.rncreq.org/documents/rapport_energie_volet3.pdf
- Deshaie, M. (2014). Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne. *Vertigo*, 14(3), 2, 14 pages. doi:10.4000/vertigo.15515
- Dictionnaire de l'économie*, Encyclopédia Universalis, sous la dir. de Jézabel Couppey-Soubeyran, Albin Michel, 2007, (pp.34, 230, 289-293), Paris.
- Ministère des Affaires Etrangères, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (2002). *Sommet mondial sur le développement durable*, (pp. 3, 4 pages). Consulté le 15 juillet 2017, depuis http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_economie_conserv.pdf

- EDF. (2017). *L'éolien en chiffres*. (2017). EDF France. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-eolien-en-chiffres>
- EDF. (2017). *Le thermique à flamme en chiffres*. (2017). EDF France. Consulté le 7 août 2017, depuis <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-thermique-a-flamme-en-chiffres>
- EDF. (2017). *Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?*. EDF France. Consulté le 8 août 2017, Consulté depuis <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire>
- EDF (2017). *Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?*. (2017). EDF France. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/qu-est-ce-qu-une-energie-renouvelable>
- Energy Information Administration [EIA]. (2016). *EIA projects 48% increase in world energy consumption by 2040*. Eia.gov. Consulté le 8 août 2017, depuis <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26212>
- EIA. (2016). *Global energy intensity continues to decline*. (2016). Eia.gov. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27032>
- EIA. (2017). *Home - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy*. Eia.gov. Consulté le 2 août 2017, depuis <https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm>
- EIA. (2017). *Hydrogen - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy*. Eia.gov. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydrogen_home
- EIA. (2017). *U.S. primary energy consumption by source and sector, 2016*. Consulté le 8 août 2017 depuis https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/flow/css_2016_energy.pdf
- EIA. (2017). *What Is Energy? - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration*. (2017). Eia.gov. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=about_home
- Eisenstein, P. (2016). *All New German Cars Must Be Emission-Free by 2030* | TheDetroitBureau.com. Thedetroitbureau.com. Consulté le 10 août 2017, depuis <http://www.thedetroitbureau.com/2016/06/all-new-german-cars-must-be-emission-free-by-2030/>

- Ellen Mac Arthur Foundation (2017). *Économie circulaire*. *Ellenmacarthurfoundation.org*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/concept>
- Enerdata. (2017). *CO₂ Emissions from fuel Combustion | World Statistics on CO₂ Updated | Energy Statistical Yearbook 2017*. *Yearbook.enerdata.net*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://yearbook.enerdata.net/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-depuis-fuel-combustion.html>
- Enerdata. (2017). *Coal and lignite Production Data | World Coal Production | Enerdata. Yearbook.enerdata.net*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-production-data.html>
- Enerdata. (2017). *Crude Oil Production Statistics | Crude Oil | Enerdata. Yearbook.enerdata.net*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://yearbook.enerdata.net/crude-oil/world-production-statistics.html>
- Enerdata. (2017). *Renewables in Electricity Production | Statistics Map by Region | Enerdata. Yearbook.enerdata.net*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>
- Enerdata. (2017). *World Energy Consumption Statistics*. *Yearbook.enerdata.net*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- Énergie+, Architecture et Climat, *Le rendement des éoliennes*. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>
- Energie non-renouvelable : définition et explications*. (2017). *Techno-science.net*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=10466>
- Energy efficiency | vmisenergy*. (2012). *Vmisenergy.com*. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://vmisenergy.com/category/energy-efficiency/>
- Energy Market Price. (2017). *Quotidien (17.03.2017): Le prix spot de l'électricité en Allemagne baisse de 17% vu les prévisions d'énergie éolienne accrue*. *Energymarketprice.com*. Consulté le 9 août 2017, depuis

<http://www.energymarketprice.com/energy-news/quotidien-17-03-2017-le-prix-spot-de-l-electricite-en-allemande-baisse-de-17-vu-les-previsions-d-energie-eolienne-accrue>

EnR, Smart City. (2014). *Du charbon aux énergies renouvelables*. Netseenergy. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://si.netseenergy.fr/charbon-aux-energies-renouvelables/>

European Environment Agency. (2017). *Final energy consumption by sector and fuel*. European Environment Agency. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>

European Union. (2017). *EDGAR - GHG (CO₂, CH₄, N₂O, F-gases) emission time series 1990-2012 per region/country - European Commission*. Edgar.jrc.ec.europa.eu. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=GHGts1990-2012&sort=des9>

Fabrégat, S. (2016). Stockage souterrain d'énergie : un potentiel à creuser. *Actu-Environnement.Com*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.actu-environnement.com/ae/news/stockage-souterrain-energie-cavites-aquiferes-gaz-hydrogene-air-comprime-chaleur-27930.php4>

Favennec, J. (2009). *Géopolitique de l'énergie* (pp. 49, 304 pages). Paris: Editions Technip.

Fawkes S., *Energy Efficiency*, Gower, 2013.

Fernandez, S. (2003). *Low-tech : la deuxième voie technologique*. *Econovateur.com*. Consulté le 9 août 2017, depuis http://www.econovateur.com/rubriques/anticiper/voirltech5_1103.shtml

Fondation David Suzuki (2011). *Le gaz naturel n'est pas la solution*. (2011). Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.davidsuzuki.org/fr/blogues/la-science-en-action/2011/07/le-gaz-naturel-nest-pas-la-solution/>

Fondation David Suzuki (2014). *Le charbon*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-d'intervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/le-charbon/>

Fondation David Suzuki. (2014). *L'énergie nucléaire*. *Fondation David Suzuki*. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-d'intervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/lenergie-nucleaire/>

- Fondation d'entreprise ALCEN pour la connaissance des énergies. (2017). *Qu'est-ce que le facteur de charge d'une unité de production électrique*. *Connaissance des Énergies*. Consulté le 7 août 2017, depuis <https://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-le-facteur-de-charge-d-une-unite-de-production-electrique-120305>
- Fondation d'entreprise ALCEN pour la connaissance des énergies. (2017). *Réseau intelligent (Smart Grid)*. *Connaissance des Énergies*. Consulté le 7 août 2017, depuis <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>
- Fondation pour la Nature et l'Homme [FNH]. (s.d.). *Dematerialisation de l'économie et conservation des ressources naturelles* (p. 3, 4 pages). Sommet mondial sur le développement durable 2002, Ministère des Affaires Étrangères, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Consulté à l'adresse http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_economie_conserv.pdf
- Foucart, S. (2011). *"La révolution thermo-industrielle bouleverse la Terre"*. *Le Monde.fr*. Consulté le 4 août 2017, depuis http://www.lemonde.fr/planete/article/2011/02/04/jacques-grinevald-la-revolution-thermo-industrielle-bouleverse-la-terre_1475176_3244.html
- Fraunhofer. (2017). *Electricity production in Germany | Energy Charts*. *Energy-charts.de*. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://www.energy-charts.de/power.htm?source=all-sources&month=12&year=2016>
- Fraunhofer. (2017). *Installed power in Germany | Energy Charts*. *Energy-charts.de*. Consulté le 9 août 2017, depuis https://www.energy-charts.de/power_inst.htm
- Frédéric, R. (1984). *Les ressources énergétiques de notre planète* (pp. 20; 221; 410-411, 443 pages). Dangles.
- Futura-Sciences. (2017). *Pourquoi la fabrication du ciment participe-t-elle au réchauffement climatique ?*. *Futura-Sciences*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-fabrication-ciment-participe-t-elle-rechauffement-climatique-4090/>
- Gadrey, J. *Dans le monde, les émissions de CO2 ont stagné en 2014, alors que la croissance était de 3,4 %*. *Formidable ?*. *Alternatives-economiques.fr*. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://www.alternatives-economiques.fr/blogs/gadrey/2015/03/23/dans-le-monde-les-emissions-de-co2-ont-stagne-en-2014-alors-que-la-croissance-etait-de-34-formidable-historique-billet-1/>

- Gagnon, L. (2003). *Émissions de gaz à effet de serre* (pp. 2-3, 8 pages). Montréal: Hydro-Québec, direction – Environnement. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf
- Geary, E. (2017). *The API gravity of crude oil produced in the U.S. varies widely across states*. *Eia.gov*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30852>
- Geldron, A. (2014). *Economie Circulaire: Notions* (p. 1). Angers: ADEME. Consulté le depuis <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-economie-circulaire-oct-2014.pdf>
- Georgescu-Roegen, N. (1995). *La décroissance. Entropie - Écologie - Économie* (2nd ed., pp. 47; 63-64; 67; 72, 254 pages). Paris: Sang de la terre.
- Gignac, R., & Schepper, B. (2015). *Au-delà du jeu des comparaisons, une approche fondée sur la science et l'équité : le budget carbone du Québec* (pp. 7, 23 pages). Institut de recherche et d'informations socio-économiques [IRIS]. Consulté le 3 août 2017, depuis http://file:///C:/Users/Sarah/Downloads/013m_institut_de_recherche_et_d_information_socio-%C3%A9conomique.pdf
- Giraud, G., Jancovici, J., & Zeynep, K. (2013). Lien PIB/consommation d'énergie. *The Shift Project*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.theshiftproject.org/fr/cette-page/liens-pib-consommation-denergie>
- Global Chance. *Les combustibles fossiles et l'effet de serre*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GCnHS1p46-47.pdf>
- Global Chance. *Bilan de l'efficacité énergétique au niveau de la demande*. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.global-chance.org/IMG/pdf/HS4_Fiche09_p38-41.pdf
- Global Wind Energy Council [GWEC]. (2017). *Global Wind Statistics 2016* (p. 2). Bruxelles: Global Wind Energy Council. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf
- Godard, C., Morin, A., Ferchaud, F., Wohlfahrt, J., Nguyen, E., & Hopquin, J. (2012). *Biomasse énergie : le point sur 15 idées reçues, Eléments d'expertise sur la valorisation énergétique de la biomasse agricole* (pp. 9;13-14, 53 pages). RMT Biomasse Energie Environnement et Territoire. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.biomasse->

territoire.info/fileadmin/site_bioter/documents_bioter/RMT_biomasse/RMT_Biomasse-Evaluation-light.pdf

Gonczy, G. (2005). *Comprendre la thermodynamique*. Paris: Ellipses.

Gordon, R. (2003). Deux siècles de croissance économique: l'Europe à la poursuite des Etats-Unis. *Ofce* 84. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/revue/1-84.pdf>

Gordon, C. (2014). *Which transport is the fairest of them all?. The Conversation*. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://theconversation.com/which-transport-is-the-fairest-of-them-all-24806>

Gouvernement du Québec. (2016). *Un virage historique permettant au Québec d'entrer dans l'économie du 21e siècle*. (2016). Site du premier ministre du Québec. Consulté 3 août 2017, à l'adresse <https://www.premier-ministre.gouv.qc.ca/actualites/communiqués/details.asp?idCommunique=2910>

Greer, J. (2013). *La fin de l'abondance* (1st ed., pp. 40;46;119;127;130-133;138;142-145;149;155;157;162-164, 236 pages). Montréal: Ecosociété.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (1992). *Changement climatique : Les évaluations du GIEC de 1990 et 1992* (pp. 8;16-17; 27-29;71-72;74;129-132;138; 182 pages). OMM/PNUE. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/French/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_fr.pdf

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (2013). *Changements climatiques 2013 - Les éléments scientifiques* (pp. v;4;12-13;17;20-26;70;149;164, 204 pages). OMM/PNUE. Consulté le 5 août 2017, depuis http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report* (pp. 4;8;20;28, 31 pages). OMM/PNUE.

Guay, J. (2017). *Allemagne - Exportations de biens et services (% du PIB) | Statistiques. Perspective.usherbrooke.ca*. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/DEU/fr/NE.EXP.GNFS.ZS.html>

- Guillo, R. Stockage d'énergie par volant d'inertie. *Ecosources.Info*. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie
- Gurria, A. (p. 2). OCDE. Consulté depuis <https://www.oecd.org/fr/env/dechets/48671413.pdf>
- Hall, C., Lambert, J., & Balogh, S. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hamour, N. (2008). *Énergies ,les défis d'hier et d'aujourd'hui*. Ellipses.
- Heinberg, R. (2015). *Our Renewable Future By Richard Heinberg*. *Countercurrents.org*. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.countercurrents.org/heinberg210115.html>
- Heinberg, R., & Lerch, D. (2010). *The Post Carbon Reader: Managing the 21st Century's Sustainability Crises* (1st ed., pp. 229-236, 523 pages). Watershed Media.
- Herman, R., Ardenaki, S., & Ausubel, J. (1990). *Dematerialization* (pp. 333-347). *Phe.rockefeller.edu*. Consulté 4 August 2017, à l'adresse <https://phe.rockefeller.edu/docs/Demat.Tech.Forecasting.pdf>
- Hydro-Québec (1996). *L'énergie de la biomasse | Les énergies renouvelables*. *Hydroquebec.com*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/energie-biomasse.html>
- Hydro-Québec Distribution. (2006). *Les coûts évités : Concepts, résultats et utilisation* (pp. 4, 44 pages). Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/Suivis/SuiviD-2006-56/HQD_Presentation_12mai06.pdf
- Hydrosphère : Définition de Hydrosphère*. (2017). *Cnrtl.fr*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrosph%C3%A8re>
- IEA-PVS Reporting Countries, Becquerel Institute (BE), RTS Corporation (JP). (2017). *Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2016* (p. 10). Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2016_1.pdf
- Ieconomics Inc. (2017). *Germany GDP Growth Rate Forecast*. *Tradingeconomics.com*. Consulté le 17 septembre 2017, depuis <https://tradingeconomics.com/germany/gdp-growth/forecast>

- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2017). *Ippc.ch*. Consulté le 2 août 2017, depuis http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml
- IPCC. (2017). *Working Group I: The Scientific Basis*. *Ippc*. Consulté le 2 août 2017, depuis <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/518.htm>
- Jackson, T. (2010). *Prosperité sans croissance* (p. 20). Bruxelles: De Boeck.
- Jacquelin, L., & Bader, A. (2013). *Le stockage souterrain de l'énergie* (pp. 101-102, pages 100-107). Geosciences. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01061149/document>
- Jancovici, J. (2003). *Pourquoi dit-on que la planète se réchauffe?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/pourquoi-dit-on-que-la-planete-se-rechauffe-2/>
- Jancovici, J. (2003). *Qu'est-ce que l'effet de serre?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/quest-ce-que-leffet-de-serre/>
- Jancovici, J. (2003). *Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/quest-ce-quune-reserve-de-petrole/>
- Jancovici, J. (2013). *Combien suis-je un esclavagiste?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/combien-suis-je-un-esclavagiste/>
- Jancovici, J. (2013). *Transition énergétique pour tous* (pp. 46;63-64, 240 pages). Odile Jacob.
- Jancovici, J. (2014). *A quand le pic de production mondial pour le pétrole ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/a-quand-le-pic-de-production-mondial-pour-le-petrole/>
- Jancovici, J. (2014). *Qu'est-ce que l'équation de Kaya ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://jancovici.com/changement-climatique/economie/quest-ce-que-lequation-de-kaya/>
- Jancovici, J. (2015). *Dormez tranquilles jusqu'en 2100* (pp. 22;24, 208 pages). Paris: Odile Jacob.

- Jancovici, J. (2015). *L'énergie, de quoi s'agit-il exactement ?*. Jean-Marc Jancovici. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/te/ENRE/3/EconomieEcologique.pdf>
- John, A., Nadel, S., & Siddiq Kahn, A. (2012). *The long-Term Energy Efficiency Potential: What the evidence suggests* (pp. figure 18 "Vehicle Fuel Efficiency depuis 1980 to 2009", p.47; 53-55). Washington: American council for an energy-efficient economy. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.garrisoninstitute.org/downloads/ecology/cmb/Laitner_Long-Term_E_E_Potential.pdf
- Kenny, R., Law, C., & Pearce, J. (2010). Towards real energy economics: Energy policy driven by life-cycle carbon emission. *Energy Policy*, 38(4), 1970; 1969-1978. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.078
- Lambert, J., Hall, C., Balogh, S., Gupta, A., & Arnold, M. (2014). Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*, 64, 153-167. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.001
- Lauer, H. (2016). Le Paysage Énergétique Allemand En 2015. *Société Française D'énergie Nucléaire [SFEN]*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.sfen.org/en/node/1475>
- Le Hir, P. (2017). *Climat : comment réduire de moitié les émissions mondiales de CO2 en 2040*. *Le Monde.fr*. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.lemonde.fr/energies/article/2017/04/25/climat-comment-reduire-de-moitie-les-emissions-mondiales-de-co2-en-2040_5116891_1653054.html#MRjmTiirHgcD3lab.99
- Le monde.fr. (2016). *La croissance allemande à son plus haut depuis quatre ans*. *Le Monde.fr*. Consulté le 10 août 2017, depuis http://www.lemonde.fr/economie/article/2016/01/14/la-croissance-allemande-a-son-plus-haut-depuis-quatre-ans_4847264_3234.html
- Leclerc, G. (2016). *Chapitre 4 - Marché du Carbone : portrait et enjeux* (pp. 6, 49 pages). Montréal. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.vgq.gouv.qc.ca/fr/fr_publications/fr_rapport-annuel/fr_2016-2017-CDD/fr_Rapport2016-2017-CDD-Chap04.pdf
- Léonard, A., Belboom, S., & Renzoni, R. *Vecteurs énergétiques et énergies renouvelables* (pp. 3, 51 pages). Liège: Université de Liège. Consulté depuis https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/83107/1/Energie_ALeonard.pdf

- Livet, F. (2017). *La France exporte de l'électricité vers l'Allemagne!*. Grenoble: Univ. Grenoble Alpes & CNRS. Consulté le 3 août 2017, depuis http://sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Livet_Allemagne.pdf
- Loiret. (2014). *Production d'électricité solaire : record battu*. Aterno. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.chauffage-aterno.com/record-production-electricite-solaire-en-allemande.html>
- Lorck, J. (2017). *L'année 2016 au-dessus de la prévision centrale des modèles du GIEC*. *global-climat*. Consulté le 2 août 2017, depuis <https://global-climat.com/2017/02/08/lannee-2016-au-dessus-de-la-prevision-centrale-des-modeles-du-giec/>
- Mankiw, N., & Taylor, M. (2011). *Principes de l'économie* (2nd éd., p. 10, 681). Bruxelles: De Boeck.
- Matthews, D., & Chavaillaz, Y. (2017). In *Gaz naturel - une énergie de transition* (p. 60, 98 pages). Montreal: Collectif scientifique sur la question du gaz de schiste. Consulté le 10 octobre 2017 depuis <http://www.collectif-scientifique-gaz-de-schiste.com/accueil/index.php/conferences/conferences-du-collectif/2017>
- McKenna, A. (2017). *Les ventes de carburant à un niveau record: consommer moins, mais rouler plus | Actualités*. *La Presse*. Consulté le 7 août 2017, depuis <http://auto.lapresse.ca/actualites/201703/21/01-5080807-les-ventes-de-carburant-a-un-niveau-record-consommer-moins-mais-rouler-plus.php>
- Mer et Marine. (2017). *Eolien offshore : L'Allemagne attribue les premiers parcs sans aucune subvention*. *Transition Énergétique*. Consulté le 10 octobre 2017, à l'adresse <http://www.transition-energetique.org/2017/04/eolien-offshore-l-allemande-attribue-les-premiers-parcs-sans-aucune-subvention.html>
- Mercier, F. (2016). *L'Allemagne bannira la Vente de voitures à essence en 2030*. Autonet.ca. Autonet. Consulté le 10 octobre 2017, à l'adresse <http://www.autonet.ca/fr/2016/06/22/lallemande-bannira-la-vente-de-voitures-a-essence-en-2030>

- Merino-Saum, A., & Roman, P. (2012). *Que peut-on apprendre de l'économie écologique ?*. *Laviedesidees.fr*. Consulté le 10 août 2017, depuis <http://www.laviedesidees.fr/Que-peut-on-apprendre-de-l.html>
- Ministère des Ressources naturelles Canada [Rncan]. (2014). *Le bon sens au volant*. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/oeo/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_12_f.pdf
- Ministère des Ressources Naturelles Canada [Rncan]. (2016). *L'univers des énergies renouvelables*. Consulté depuis <https://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296>
- Ministère du développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques [Mddelcc]. (2017). *Développement durable : définition et objectifs*. *Mddelcc.gouv.qc.ca*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/definition.html>
- Ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie [BMWI]. *6ème programme de recherche du gouvernement fédéral dans le domaine de l'énergie*. *BMWI.de*. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Artikel/Energie/recherche-pour-un-approvisionnement-energetique-respectueux-de-l-environnement-fiable-et-abordable.html>
- Ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie, [BMWI]. (2017). *Énergies vertes pour l'avenir*. Berlin: Christina Sasch.
- Morris, G., & Pehnt, M. (2012). *Le PIB de l'Allemagne ne cesse d'augmenter avec moins d'énergie*. *Drupal*. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://book.energytransition.org/fr/infographic>
- Morris, G., & Pehnt, M. (2015). *La Transition Énergétique, L'Energiewende Allemande* (pp. 11-13;23-24;42;49;77;80;82;85-86;166; 168; 351-352, 357 pages). Fondation Heinrich Böll.
- Mraz, S. (2013). *Measuring the costs of electrical storage*. *Machine Design*. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://www.machinedesign.com/batteriespower-supplies/measuring-costs-electrical-storage>

- Murphy, D. (2013). The implications of the declining energy return on investment of oil production. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, 372(2006). doi:10.1098/rsta.2013.0126
- Murphy, D., & Hall, C. (2010). Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals Of The New York Academy Of Sciences, Ecological Economics Reviews*, 1185(1), 102-118. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x
- Nature Québec. (2015). *Plus qu'une cible à atteindre, un effondrement à éviter*. (2015). Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.naturequebec.org/fichiers2015/publications/ME15-10-02_ChangClim.pdf
- NégaWatt dir. (2013). *Scénario négaWatt 2011* (pp. 13, 28 pages). Valence: Association NégaWatt. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://negawatt.org>
- Netherland Environmental Assesment Agency & ECOFYS. (2009) (pp. 5, 22 pages). Bonn. Consulté le 3 août 2017, depuis https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/emission_reductions_for_stabilizing.pdf
- Nienaber, M., & Nasr, J. (2017). *La croissance en Allemagne à 1,9% en 2016, au plus haut en 5 ans*. *Capital.fr*. Consulté le 27 septembre 2017, à l'adresse <http://www.capital.fr/economie-politique/la-croissance-en-allemande-a-1-9-en-2016-au-plus-haut-en-5-ans-1199297>
- Nikiforuk, A. (2017). *L'énergie des esclaves* (p. 240 pages). Montréal: Ecosociété.
- Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Heide, D., & de Tena, D. et al. (2012). *Long-term scenarios and strategies for the deployment of renewable energies in Germany in view of European and global developments* (pp. 9, 40 pages). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung. Consulté depuis http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2012_1/leitstudie2011_kurz_e_n_bf.pdf
- Notre-planete.info. (2017). *Pollution de l'air : les particules fines (PM2,5, PM10)*. *Notre-planete.info*. Consulté le 3 août 2017, depuis https://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/particules-fines.php

- OCDE. (2012). *Horizon 2060 : perspectives de croissance économique globale à long terme* (p. 7-8). OCDE. Consulté à l'adresse <http://www.oecd.org/fr/eco/perspectives/Horizon%20French%20FINAL.pdf>
- OECD and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2012). *The OECD Environmental Outlook to 2050* (p. 1). OCDE. Consulté le 3 août 2017, depuis http://www.oecd.org/env/cc/Outlook%20to%202050_Climate%20Change%20Chapter_HIGHLIGHTS-FINA-8pager-UPDATED%20NOV2012.pdf
- ONU (2015). *Objectif 7 Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable. Chronique ONU. Unchronicle.un.org*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://unchronicle.un.org/fr/article/objectif-7-garantir-l-acc-s-de-tous-des-services-nerg-tiques-fiables-durables-et-modernes--0>
- ONU (2016). *L'objectif de développement durable relatif à l'énergie et les technologies de l'information et de la communication | Chronique ONU. Unchronicle.un.org*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://unchronicle.un.org/fr/article/l-objectif-de-d-veloppement-durable-relatif-l-nergie-et-les-technologies-de-l-information--0>
- OpenEI. *Transparent Cost data Base*. Consulté le 3 août 2017, depuis http://en.openei.org/apps/TCDB/transparent_cost_database
- Ottombre-Borsoni, M. *Beaucoup d'énergie sans le savoir | Quelle énergie durable pour demain ?*. *Energiepourdemain.fr*. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://energiepourdemain.fr/beaucoup-d-energie-sans-le-savoir/#01>
- Owen, D. (2013). *Vert paradoxe* (pp. 89;90 210 pages). Montréal: Écosociété.
- Pearce, J. (2009). *Optimizing Greenhouse Gas Mitigation Strategies To Suppress Energy Cannibalism*. Ontario. Consulté le 5 août 2017, depuis <https://pdfs.semanticscholar.org/41bc/80f62ed1e78f795cd8000d024c4a54ddf8ed.pdf>
- Programme des Nations Unies pour le développement [PNUD]. (2017). *Énergie durable. UNDP*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.undp.org/content/undp/fr/home/ourwork/climate-and-disaster-resilience/sustainable-energy.html>
- Quiret, M. (2017). *Du charbon liquide pour l'après-pétrole*. *lesechos.fr*. Consulté le 4 août 2017, depuis https://www.lesechos.fr/03/04/2008/LesEchos/20144-058-ECH_du-charbon-liquide-pour-l-apres-petrole.htm

- Rajca, P. (2015). *Les méthodes de calcul pour le Produit Intérieur Brut (PIB)*. EducationFinance.ca. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.educationfinance.ca/economie/les-methodes-de-calcul-pour-le-produit-interieur-brut-pib/>
- Revel, S. (2013). *Les différents types de conversion d'énergie*. Energieplanete.fr. Consulté le 2 août 2017, depuis <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-types.html>
- Rifkin, J. (2013). *The third industrial revolution*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2017). *Energy Production & Changing Energy Sources*. Our World In Data. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources/>
- Roddiër, f. (2012). Les syndrome de la reine rouge. Institut Momentum. Consulté le 5 août 2017, depuis <http://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2013/10/le-syndr%C3%B4me-de-la-reine-rouge.pdf>
- Roddiër, F. (2014). Thermodynamique et économie des sciences exactes aux sciences humaines. *Res-Systemica*, 12(3), 2-4. Consulté le 5 août 2017, depuis <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/vol12-msc/res-systemica-vol-12-art-03.pdf>
- Romain, B. (2017). *La pollution numérique est-elle connue et comprise de tous ?*. Les Mondes Numériques. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://lesmondesnumeriques.wordpress.com/2017/02/14/la-pollution-numerique-est-elle-con nue-et-comprise-de-tous/>
- Romerio, F. (2007). *Les controverses de l'énergie* (1st ed.). Le Savoir suisse.
- Rondreux, V. (2014). *Contenir le réchauffement à +2°C, c'est programmer une sortie des énergies fossiles*. Dr Pétrole & Mr Carbone. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://dr-petrole-mr-carbone.com/contenir-le-rechauffement-a-2c-cest-programmer-une-sortie-des-energies-fossiles/>
- Sapy, G. (2013). *La transition énergétique, Pourquoi et comment elle va changer votre vie* (pp. 21, 218 pages). Paris: L'Harmattan.
- Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement (s.d.). *Ampoules et lampes – energie-environnement.ch*. Energie-environnement.ch. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://www.energie-environnement.ch/maison/eclairage-et-piles/ampoules-et-lampes>

- Schlomann, B., & Eichhammer, W. (2012). *Energy Efficiency Policies and Measures in Germany* (p. 15-17). Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Consulté le 5 août 2017, depuis http://file:///C:/Users/ochamakh/Downloads/Energy_Efficiency_Policies_and_Measures_in_Germany.pdf
- Schwartzentruber, J. *Thermodynamique. - Exercice : Système fermé ou ouvert ?*. *Nte.mines-albi.fr*. Consulté le 13 septembre 2017, depuis http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/exo_Systemes.html
- Schwoerer, P. (2017). Le volant d'inertie, un avenir pour la mobilité électrique et les énergies renouvelables ?. *Avem*. Consulté le 7 juin 2017, depuis <http://www.avem.fr/actualite-le-volant-d-inertie-un-avenir-pour-la-mobilite-electrique-et-les-energies-renouvelables-6396.html>
- Sgouridis, S., Csala, D., & Bardi, U. (2016). *The sower's way: quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition*. Consulté le 10 août 2017, depuis <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/094009>
- Sigmar Gabriel. (2016). *La loi sur les énergies renouvelables de 2016 crée un changement de paradigme et marque le début de la prochaine phase de la transition énergétique*. Consulté le 7 juin 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2016/20160608-gabriel-eeg-2016-schafft-paradigmenwechsel-und-ist-start-fuer-die-naechste-phase-der-energiewende.html>
- Sigmar Gabriel. (2016). *Le Bundestag adopte une vaste réforme du marché de l'électricité et l'adapte à la transition énergétique*. Consulté le 9 juin 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2016/20160624-gabriel-bundestag-verabschiedet-reform-strommarkt.html>
- Stanford, J. (2011). *Petit cours d'autodéfense en économie* (pp. 70, 476 pages). Lux.
- Statistique Canada. (2016). *Énergie*. *Statcan.gc.ca*. Consulté le 4 août 2017, depuis <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-402-x/2012000/chap/ener/ener-fra.htm>
- Statistique Canada. (2017). *Indice des prix à la consommation, par province (mensuel) (Canada)*. *Statcan.gc.ca*. Consulté le 5 octobre 2017, à l'adresse <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/cpis01a-fra.htm>

- Statistique Canada. (2017). *Changements climatiques au Canada*. (2017). *Statcan.gc.ca*. Consulté le 2 août 2017 depuis <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm>
- Stiglitz, J., Walsh, C., & Lafay, J. (2014). *Principes d'économie moderne* (p. 938). Bruxelles: De Boeck.
- Stöcker, H., Jundt, F., & Guillaume, G. (1999). *Toute la physique* (pp. 60;675;676, 1190 pages). Liège: Dunod.
- Templier, S. (2015). *Voiture à hydrogène: le rêve... et la réalité* | Sébastien Templier | *Auto écolo. La Presse*. Consulté le 7 août 2017, depuis <http://auto.lapresse.ca/auto-ecolo/201502/17/01-4844947-voiture-a-hydrogene-le-reve-et-la-realite.php>
- Teske, S., Sawyer, S., & Schäfer, O. (2015). *Energy [r]Evolution* (pp. 27, 364 pages). Greenpeace International, Global Wind Energy Council, Solar Power Europe.
- The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWI). (2016). *Fifth "Energy Transition" Monitoring Report - 2015 Reporting Year* (pp. 7, 156 pages). Berlin: BMWI. Consulté le 7 juin 2017, depuis https://www.BMWI.de/Redaktion/EN/Publikationen/monitoring-report-2016-summary.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- The Shift Project. (s.d.). *Oil Production extrapolation. The Shift Project*. Consulté le 4 avril 2017, depuis <http://www.tsp-data-portal.org/Oil-Production-Extrapolation-URR-Analysis#tspQvChart>
- Theurillat-Cloutier, A. (2014). *D'une impasse à une autre. Raisons sociales*. Consulté le 8 août 2017, depuis <http://raisons-sociales.com/articles/dune-impasse-autre/>
- Thévard, B. (2013). La diminution de l'énergie nette, frontière ultime de l'Anthropocène, Séminaire du 13 décembre 2013. *Institut Momentum*, 3-4, 7 pages. Consulté le 11 juin 2017, depuis <http://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2014/01/La-diminution-de-l%E2%80%99%C3%A9nergie-nette.pdf>
- Tremblay, H. (2013). Le rendement énergétique net : principe cardinal d'une politique québécoise à l'égard des hydrocarbures. *Revue Internationale D'Études Québécoises*, 16(2), 143-160. doi:10.7202/1025217ar
- Union Française de l'électricité [UFE]. (2014). *L'intensité énergétique* (pp. 1, 2 pages). UFE. Consulté le 17 juin 2017, depuis <http://ufe-electricite.fr/IMG/pdf/8.pdf>

- United Nations Environment Programme [PNUE]. (2011). *Decoupling Natural Resource Use And Environmental Impacts From Economic Growth* (p. 111). International Resource Panel. Consulté le 8 août 2017 depuis http://www.gci.org.uk/Documents/Decoupling_Report_English.pdf
- Villeneuve, C. (2014). *Une cible inatteignable. Le Devoir*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/419592/une-cible-inatteignable>
- Vmisenergy. (2012). *Energy intensity | vmisenergy. Vmisenergy.com*. Consulté le 10 août 2017, depuis <https://vmisenergy.com/tag/energy-intensity/>
- Waline, C. (2017). *La hausse des prix du pétrole : une fatalité ou le retour du politique*. Le Sénat. Consulté le 8 juin 2017 depuis <https://www.senat.fr/rap/r05-105/r05-10513.html>.
- Wayne, G. (2013). *Now available: a guide to the IPCC's new RCP emissions pathways*. *the Guardian*. Consulté le 3 août 2017, depuis <https://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-per-cent/2013/aug/30/climate-change-rcp-handly-summary>
- Wehrmann, B. (2017). *German onshore wind power – output, business and perspectives*. *Clean Energy Wire*. Consulté le 9 août 2017, depuis <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/german-onshore-wind-power-output-business-and-perspectives>
- Wernick, I., Herman, R., Govind, S., & Ausubel, J. (1996). *Materialization and Dematerialization: Measures and Trends -Wernick, Herman, Govind, and Ausubel*. *Phe.rockefeller.edu*. Consulté le 4 août 2017, depuis <https://phe.rockefeller.edu/Daedalus/Demat/>
- Whitmore, J., & Pineau, P. (2016). *Etat de l'Energie au Québec* (pp. 4-5, 39 pages). Montréal: Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal.
- World Data Bank. (2017). API_DEU_DS2_en_excel_v2 (version 2) [Excel]. Consulté le 19 septembre, depuis <https://data.worldbank.org/country/germany?view=chart>
- World Data Bank. (2017). *Germany | Data*. *Data.worldbank.org*. Consulté le 9 août 2017, depuis <http://data.worldbank.org/country/germany?view=chart>

- World Data Bank. (2017). *Indicateurs du développement dans le monde*. Databank.banquemondiale.org. Consulté le 7 août 2017, depuis <http://databank.banquemondiale.org/data/reports.aspx?source=indicateurs-du-d%C3%A9veloppement-dans-le-monde&preview=on>
- World Data Bank. (2017). *Importations de biens et de services (% du PIB)*, API_NE.IMP.GNFS.ZS_DS2_fr_excel_v2 (version 2) [Excel]. Consulté le 10 octobre 2017 à l'adresse <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NE.IMP.GNFS.ZS>
- World Resources Institute [WRI]. (2017). *WRI's climate data explorer, CAIT_Country_GHG_Emissions - All_Data-02022017* [Excel]. *CAIT Climate Data Explorer*. Consulté 19 septembre 2017, depuis <http://cait2.wri.org/historical/US%20State%20GHG%20Emissions>
- Zehner, O. (2012). *Green illusions*. Lincoln: University of Nebraska Press.
- Zypries, B. (2017). *La recherche sur l'énergie est un élément stratégique de la transition énergétique*. Consulté le 3 août 2017, depuis <http://www.BMWI.de/Redaktion/FR/Pressemitteilungen/2017/20170412-zypries-energieforschung-ist-strategisches-element-der-energiewende.html>

Annexe : EROI

ENERGY-RETURN-ON-INVESTMENT (EROI) OF ENERGY SYSTEMS

Table 4.2 EROI of different energy resources, adapted from Hall et al. (2014).

Energy resource	Year	Country	EROI (X:1)*	Reference
<i>Coal</i>				
Coal production	1950	USA	80	Cleveland et al. (1984)
Coal production	1993	China	33	Hu et al. (2013)
Coal production	2010	China	27	Hu et al. (2013)
Electricity production	n/a	n/a	30	Weißbach et al. (2013)
<i>Conventional oil and gas (combined production)</i>				
Oil and gas production	1999	Global	35	Gagnon et al. (2009)
Oil and gas production	2006	Global	18	Gagnon et al. (2009)
Oil and gas production	1933	USA	22.3	Guilford et al. (2011)
Oil and gas production	1970	USA	20	Guilford et al. (2011)
Oil and gas production	2000	USA	15	Guilford et al. (2011)
Oil and gas production	2007	USA	11	Guilford et al. (2011)
Oil and gas importation	2007	USA	12	Guilford et al. (2011)
Oil and gas production	1970	Canada	63	Freise (2011)
Oil and gas production	2010	Canada	11	Poisson & Hall (2013)
Oil and gas production	2008	Norway	40	Grandell (2011)
Oil and gas production	2009	Mexico	45	Ramirez & Hall, 2013
Oil and gas production	2010	China	10	Hu et al. (2013)
<i>Conventional oil (alone)</i>				
Oil production	2008	Norway	21	Grandell (2011)
<i>Conventional dry gas (alone)</i>				
Natural gas production	2005	USA	67	Soll et al. (2011)
Natural gas production	1993	Canada	38	Freise (2011)
Natural gas production	2000	Canada	26	Freise (2011)
Natural gas production	2009	Canada	20	Freise (2011)
Electricity production	n/a	n/a	28	Weißbach et al. (2013)
<i>Unconventional fossil fuels</i>				
Deep off-shore oil	2009	Gulf of Mexico	5.5	Moerschbacher & Day (2011)
Heavy oil	2003	California	3	Brandt (2011)
Tar sands	2010	Canada	6	Brandt et al. (2013)
Tar sands	2000	Canada	4	Poisson & Hall (2013)
Shale oil	n/a	n/a	n/a	Despite increasing production in the USA, no actual studies for now.
Shale gas	n/a	n/a	n/a	
Oil shale				
in situ (retorting) technology	2008		1.8	Brandt (2008)
ex situ (mining) technology	2009		2.2	Brandt (2009)
<i>Nuclear</i>				
Electricity production	2010	n/a	75	Weißbach et al. (2013)
<i>Renewables**</i>				
Hydropower without buffering	n/a	n/a	50	Weißbach et al. (2013)
Hydropower with buffering	n/a	n/a	33	Weißbach et al. (2013)
Wind without buffering	n/a	n/a	20; 16	Kubiszewski et al. (2010); Weißbach et al. (2013)
Wind with buffering	n/a	n/a	4	Weißbach et al. (2013)
Geothermal (electricity production)	n/a	n/a	23	Arlason & Umthorsson (2014)
Wave/Tidal	n/a	n/a	15	Halloran (2008)
<i>Concentrating Solar Power (CSP)</i>				
Parabolic trough without buffering	n/a	n/a	19	Weißbach et al. (2013)
Parabolic trough with buffering	n/a	n/a	9	Weißbach et al. (2013)
Fresnel plant without buffering	n/a	n/a	17	Weißbach et al. (2013)
Fresnel plant with buffering	n/a	n/a	8.2	Weißbach et al. (2013)
Solar tower	n/a	n/a	20	Kreith & Krumdieck (2014)
Photovoltaic without buffering	n/a	n/a	4; 12	Kangai et al. (2012); Weißbach et al. (2013)
Photovoltaic with buffering	n/a	n/a	2.5	Weißbach et al. (2013)
<i>Biomass (feedstock)</i>				
Ethanol (sugarcane)	n/a	n/a	4; 8	Soam et al. (2015); Goldemberg et al. (2008)
Ethanol (corn or wheat)	n/a	n/a	0.7; 1.6	Pimentel & Patzek (2005); Farrell et al. (2006)
Ethanol (wood/straw)	n/a	n/a	2/3.3	Krumdieck & Pags (2013)
Ethanol (algae)	n/a	n/a	0.3; 0.4	Beal et al. (2012); Seghezzo (2014)
Biodiesel (soybean or sunflower)	n/a	n/a	0.6; 3	Pimentel & Patzek (2005); Pradhan et al. (2011)

* EROI in excess of 5:1 have been rounded to the nearest whole number.

** EROI for renewables are assumed to vary based on geography and climate and are not attributed to a specific region/country.

